



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Optimización de la etapa físico-química en la ETAP de La Presa (Manises). Estudio de diferentes alternativas para la mejora del rendimiento del proceso y reducción de costes en el tratamiento.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Escolano Alemany, Fernando

Tutor/a: Ferrer Polonio, Eva

Cotutor/a: Iborra Clar, Alicia

Cotutor/a externo: Añó Soto, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

ÍNDICE

1. OBJETIVO.....	7
2. JUSTIFICACIÓN.....	8
3. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES.....	10
4. INTRODUCCIÓN.....	11
4.1. Potabilización moderna.....	12
4.2. Plantas potabilizadoras de agua.....	12
4.2.1. <i>La Presa de Manises</i>	14
4.3. Tratamientos en la ETAP La Presa.....	18
4.3.1. <i>El pretratamiento.</i>	18
4.3.2. <i>Coagulación/floculación y Decantación.</i>	19
4.3.3. <i>Filtrado.</i>	20
4.3.4. <i>Desinfección.</i>	20
4.4. Tratamientos físico-químicos.....	21
4.5. Coagulación-floculación.....	23
4.6. Sistema de dosificación.....	25
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	26
5.1. Equipos utilizados en laboratorio y técnicas analíticas.....	27
5.1.1. <i>Procedimiento experimental del ensayo de jarras (Jar-Test).</i>	28
5.2. Equipos utilizados a escala real.....	29
5.3. Estudio 1: Optimización del coagulante usado en planta mediante la adición de floculantes a escala laboratorio.....	31
5.4. Estudio 2: Comparativa entre coagulantes a escala laboratorio y a escala real.....	33
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36

6.1. Resultados del estudio 1. Optimización del coagulante usado en planta mediante la adición de floculantes a escala laboratorio.	36
<i>6.1.1. Prueba 1. Optimización del coagulante sin floculantes.</i>	<i>36</i>
<i>6.1.2. Prueba 2. Optimización del coagulante con la adición de floculantes.</i>	<i>38</i>
6.2. Resultados del estudio 2. Comparativa entre coagulantes a escala laboratorio y a escala real.....	45
<i>6.2.1. Prueba 3. Comparativa entre coagulantes a escala de laboratorio.</i>	<i>45</i>
<i>6.2.2. Prueba 4. Comparativa entre el nuevo coagulante y el usado en planta a escala real.</i>	<i>46</i>
7. CONCLUSIONES	51
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Presencia de los objetivos de desarrollo sostenible en el trabajo	10
Tabla 2. Tiempo de decantación de partículas de diferente tamaño.....	21
Tabla 3. Relación entre velocidad de la bomba y caudal dosificado de coagulante nuevo.....	35
Tabla 4. Resumen de ensayos realizados en la prueba 1.....	36
Tabla 5. Resultados de los ensayos con PAC + Almidón.....	38
Tabla 6. Resultados de los ensayos con PAC + 1mg/L polydadmac.....	40
Tabla 6 (continuación). Resultados de los ensayos con PAC + 1mg/L polydadmac.....	41
Tabla 7. Resultados de los ensayos con PAC + poliacrilamida (0,25 y 1 mg/L).....	42
Tabla 8. Resultados de los ensayos con PAC + poliacrilamida (0,5, 0,8 y 1 mg/L).....	44
Tabla 9. Prueba 3: Relación entre la turbidez final obtenida y la concentración de PAC dosificado.....	45
Tabla 10. Prueba 3: Jar-test con PAC y 5 coagulantes nuevos.....	45
Tabla 11. Prueba 3: Jar-test para optimizar la concentración de Natpol ST50 y Natpol ST335....	46
Tabla 12. Prueba 4. Datos día 1.....	47
Tabla 13. Prueba 4. Datos día 2.....	49
Tabla 14. Prueba 4. Datos día 3.....	50

Índice de Figuras

Figura 1. Primeras plantas potabilizadoras.....	12
Figura 2. Estructura general de una planta potabilizadora. (https://www.areaciencias.com/biologia/potabilizacionydepuraciondelagua/).....	13
Figura 3. ETAP la presa.	15
Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de potabilización.....	15
Figura 5. Decantador circular Alta 1.	17
Figura 6. Decantador Densadeg Alta 2.	17
Figura 7. Diseño decantador Densadeg.	19
Figura 8. Modelo de doble capa de una partícula coloidal.....	22
Figura 9. Curva de energía neta de interacción.	23
Figura 10. JLT Floculadores.	27
Figura 11. Turbidímetro.	28
Figura 12. Esquema de la instalación para el proceso de coagulación-floculación-decantación.	29
Figura 13. Conjunto de lamelas del decantador.	30
Figura 14. Bomba de impulsión coagulante.	34
Figura 15. Cubeto de repartición.	35
Figura 16. Prueba 1: ensayos 1-5. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%) en función de la concentración de PAC.	37
Figura 17. Prueba 2. Ensayos 2 y 6. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%). ...	39
Figura 18. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%) en función de la concentración de Polydadmac para 20mg/L de PAC.....	40

Figura 19. Prueba 2. Ensayos 2 y 1 frente ensayos 12 y 13. Comparación del rendimiento de eliminación de turbidez (RE%) de los ensayos con PAC frente a los que se emplean PAC + 1mg/L de polydadmac.	41
Figura 20. Prueba 2. Ensayos 2 frente ensayos 14 y 16. Comparación del rendimiento de eliminación de turbidez (RE%) de los ensayos con PAC frente a los que se emplean PAC + poliacrilamida.	43
Figura 21. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 1.	48
Figura 22. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 2.	49
Figura 23. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 3.....	50

1. OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es obtener una mejora de rendimiento en la etapa de coagulación-floculación-decantación utilizada en una de las líneas de producción de la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) La Presa. Para ello se realizan dos estudios, que dan lugar a unos objetivos específicos diferentes. En el primero de ellos se quiere analizar la mejora de rendimiento del coagulante con la adición de floculantes. En el segundo se estudian nuevos coagulantes, se selecciona el que da mejores resultados y finalmente se compara con el coagulante que se emplea actualmente en la ETAP La Presa.

Estudio 1.

Consiste en un estudio experimental de laboratorio donde se realizan ensayos de jarras cuyos objetivos específicos son:

- Encontrar la concentración óptima del coagulante empleado en el proceso de tratamiento mediante la realización de varios ensayos de jarras con el mismo agua problema y variando su dosificación.
- Comparar tres floculantes diferentes, obteniendo la dosis óptima para cada uno de ellos.
- Estudiar el efecto de la adición de floculantes sobre el rendimiento en la etapa de coagulación-floculación.
- Evaluar el tipo y la calidad de los flóculos formados en cada ensayo.

Estudio 2.

En una primera parte se realiza un estudio experimental donde se prueban varios coagulantes mediante ensayos de jarras. Los objetivos específicos de esta parte son:

- Comparar la turbidez final obtenida con los diferentes coagulantes, con la obtenida con el coagulante empleado en planta.
- Reducir la concentración del coagulante más efectivo hasta conseguir una turbidez igual al usado en planta.

Posteriormente, y para los resultados óptimos obtenidos, se lleva a cabo un estudio a escala real. Este estudio consiste en operar en paralelo con los dos decantadores Densadeg, de tipo lamelar, situados en la línea “ALTA 2” de La Presa. Uno de los decantadores trabaja con el coagulante habitual y en el otro, se emplea el nuevo coagulante. Los objetivos específicos de los ensayos a escala real son los siguientes:

- Probar a escala real en paralelo el coagulante usado en planta con el de menor turbidez final obtenido en el apartado anterior (misma concentración).
- Comprobar si la reducción de dosificación obtenida en el laboratorio del nuevo coagulante con respecto al empleado en planta se mantiene a escala real.
- Realizar un estudio económico.

2. JUSTIFICACIÓN

En el planeta, uno de los recursos más importantes es el agua, fundamental para la vida de todo individuo y, además, es un generador de riqueza para la comunidad al brindarles diferentes servicios. Sin embargo, este es un recurso natural cada día más escaso en su estado potable, y esto se debe, principalmente, a la contaminación del agua, a los largos periodos de sequía provocados por el cambio climático y la explotación desmedida de este recurso por parte de la industria. Bajo este contexto, se plantea la necesidad de implementar una conciencia social para el uso equilibrado y racional de este recurso.

El agua presenta una gran capacidad para regenerarse, por medio del ciclo del agua o ciclo hidrológico; naturalmente el planeta cuenta con la capacidad de reciclar y reutilizar de manera efectiva y constante este recurso bajo sus propios métodos (Yolanda Cárdenas, 2000).

Sin embargo, las diversas actividades económicas y sociales han afectado en distintos grados a la calidad del agua, afectando directamente a la capacidad de autodepuración, y haciendo que ésta no resulte suficiente o que sobrepase las capacidades naturales de esta actividad. Algunas de estas actividades contaminantes o aquellas que dificultan estos procesos son:

- Descargas de aguas residuales con altos contenidos de materia inorgánica, orgánica o metales pesados.
- Explotación de recursos como la tala de bosques.
- Desarrollo y poco control en el sector agropecuario.
- Siembra de cultivos desmedida.

Derivado de la problemática del agua, y su baja capacidad de autodepuración, se han implementado protocolos de acción en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) y en las ETAP.

La ETAP es una infraestructura que desarrolla un papel fundamental en la sociedad y en el desarrollo humano, ya que, su objetivo principal es la producción de agua potable a partir de agua superficial y subterránea. Para ello emplean tratamientos físicos y químicos que garantizan su calidad, dejándola libre de contaminantes. Muchos de estos contaminantes se encuentran en el agua en forma de impurezas solubles e insolubles, como son las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos.

La turbidez del agua viene dada por la concentración de estas partículas, y para su eliminación es necesario someter al agua a un proceso físico-químico conocido como coagulación-floculación.

En este trabajo se busca optimizar el proceso de coagulación-floculación en la ETAP La Presa por medio del uso de diferentes reactivos. Se busca conseguir un mayor porcentaje de eliminación de la turbidez del agua con la mínima cantidad posible de reactivos. De esta forma se pueden reducir costes en el proceso y hacer más accesible su distribución.

Por otro lado, con una reducción de la dosificación se obtendría una mayor calidad del agua al reducir la carga química de la misma.

Finalmente, el conocer posibles reactivos que se puedan utilizar, amplía el número de proveedores de coagulante a la planta potabilizadora, asegurando el proceso en el caso de que fallase algún distribuidor del producto.

Se puede señalar que es imprescindible realizar ensayos en laboratorio, antes de llevarlos a cabo a escala real. De esta forma se obtienen ventajas, y se asegura que, al realizar los ensayos a escala real, la producción no se ve afectada. En concreto las ventajas de realizar un estudio de laboratorio previo al estudio a escala real:

- Validación de la viabilidad técnica y económica: Los ensayos de laboratorio permiten validar la viabilidad técnica del proceso en condiciones reales. Esto se consigue al comprobar que el sistema cumple con los requisitos de rendimiento establecidos. También permite validar la viabilidad económica del proceso, es decir, que los beneficios previstos superen a los costes de inversión y operación.
- Obtención de información sobre el rendimiento: Los ensayos de laboratorio permiten obtener información sobre el rendimiento del proceso en funcionamiento continuo. Esta información es fundamental para optimizar el sistema y garantizar su funcionamiento eficiente. La información sobre el rendimiento va ligada a los costes, el consumo de energía y recursos, y la calidad del producto obtenido.

Además, la realización de este trabajo también está motivado por razones académicas, para demostrar las aptitudes que se han ido adquiriendo a lo largo de esta carrera académica. Algunos de los conocimientos vistos en la carrera y que han servido para la realización de este trabajo son: el proceso de potabilización y funcionamiento de una ETAP; el uso de equipos e instalaciones químicas del laboratorio; el conocimiento en cálculo y mediciones; lectura y entendimiento de fichas de seguridad de productos químicos; el uso de herramientas informáticas de búsqueda y clasificación de recursos bibliográficos, etc.

3. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES.

La Organización de las Naciones Unidas creó el 26 de septiembre de 2015 una serie de objetivos a cumplir, con la finalidad de mejorar el mundo en el que vivimos. Estos objetivos se conocen con el nombre de objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Los ODS están compuestos por 17 objetivos. En la Tabla 1 se presentan estos ODS, señalando aquellos sobre los que este trabajo tiene una implicación más directa.

Tabla 1. Presencia de los objetivos de desarrollo sostenible en el trabajo

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.				X
ODS 4. Educación y pobreza.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.	X			
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsable.		X		
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

El ODS 6. Agua limpia y saneamiento es obtener un agua libre de impurezas y accesible para todo el mundo. Las estrategias para lograr este objetivo combinan el aumento de la inversión en todo el sector, promover la innovación a partir de pruebas, mejorar la coordinación entre todas las partes interesadas y adoptar un enfoque más integrado de la gestión del agua.

En este trabajo se realiza un estudio que busca reducir el vertido de productos químicos al agua, minimizando la cantidad de agua residual generada y aumentando la calidad del agua potable producida. Además, el abaratar los costes de producción de agua potable facilita su acceso a todo el mundo.

El ODS 12. Producción y consumo responsable, pretende garantizar modos de consumo y producción sostenible, es decir, hacer más y mejores cosas con menos recursos. Una de las metas a lograr dentro de este ODS, es lograr una gestión sostenible y un uso eficiente de los recursos naturales.

Dentro de este trabajo, se ayuda a contribuir en esa meta, ya que al mejorar el proceso de coagulación-floculación-decantación lo que se consigue es usar de forma más eficiente un recurso natural como es el agua.

4. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se puede observar cómo las civilizaciones conocían la importancia de obtener un agua de calidad para asegurar el crecimiento y evitar la desaparición de sus comunidades (Mumford, 2005). Debido a esto los primeros asentamientos se construyeron cerca de fuentes de agua, y una de sus mayores preocupaciones era la mejora de calidad de esta.

Los primeros asentamientos se centraron en conseguir una mejora del agua en parámetros medibles por los sentidos, se preocupaban de obtener un mejor color, olor y sabor. Para ello empleaban diferentes técnicas, algunas de ellas semejantes a las actuales. Por ejemplo, los antiguos pueblos orientales hacían pasar el agua por arena y barro poroso para filtrarla. Otros pueblos, como los griegos, recomendaban diferentes métodos a sus ciudadanos para mejorar la calidad del agua, tales como la filtración con carbón vegetal, la exposición del agua a los rayos del sol o llevar a ebullición el agua previa a su uso (Osorio, 2008).

En el antiguo Egipto se dejaba reposar el agua en vasijas durante meses para que se depositaran las partículas en el fondo (decantación) y por medio de un sifón se extraía el agua de la superficie. Además, se empleaban productos para acelerar la precipitación (coagulación), hay datos que hacen referencia al uso de alumbre (sulfato de alúmina) para lograr precipitar las partículas suspendidas en el agua (Lapeña, 1989).

4.1. Potabilización moderna.

El primer sistema de suministro de agua potable fue en 1804 en la ciudad de Glasgow (Figura 1). Dos años después se puso en funcionamiento la primera planta de tratamiento de agua en París donde se conseguía potabilizar el agua dejándola reposar en balsas durante 12 horas, para conseguir la sedimentación de partículas y, posteriormente, se filtraba por medio de filtros de arena y carbón. A lo largo del siglo XIX, el avance en la ciencia permitió conocer el origen de muchas enfermedades con el descubrimiento de las bacterias.

Aunque no es hasta el siglo XX, cuando se le da la importancia necesaria a la calidad del agua. Tras diversos estudios, se demuestra que muchas de estas bacterias se encuentran en el agua, y es en ese momento cuando se empieza a investigar y llevar a cabo la desinfección química por medio del cloro y otros compuestos.

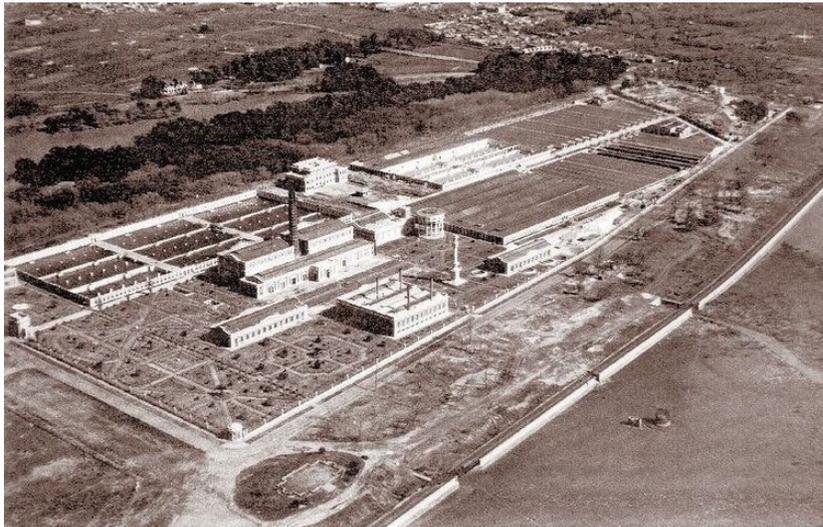


Figura 1. Primeras plantas potabilizadoras.

También se implementó la filtración; un método efectivo para purificar el agua a pesar de ser considerado un proceso largo (Osorio, 2008).

4.2. Plantas potabilizadoras de agua.

La potabilización del agua en la actualidad se lleva a cabo en instalaciones que tienen como finalidad la reducción de contaminantes y residuos de las aguas. A estas instalaciones se las conoce como ETAP o plantas potabilizadoras. Estas plantas realizan la potabilización de aguas naturales, que pueden emplearse para usos seguros entre la comunidad.

Toda planta potabilizadora tiene una estructura y unos pasos específicos que se deben seguir para lograr la calidad del agua para uso humano. Se deben tener en cuenta las condiciones del agua previas a la entrada en la planta para poder realizar los procesos que realmente requiere.

Antes de llegar a la planta, el agua que se va a potabilizar es captada del agua natural, esta pasa por diferentes procesos de purificación previa a la potabilización.

Las ETAP incluyen los siguientes procesos: mezcla rápida y lenta por medio de pantallas giratorias para eliminar los residuos sólidos presentes, tratamientos fisicoquímicos con coagulantes y floculantes, seguidos de una sedimentación y filtración. Antes de la distribución, el agua debe pasar por un proceso de evaluación, donde se considera si se ha logrado la potabilización y si es apta para el consumo humano (Gutiérrez, et al., 2014).

En la Figura 2, se presenta la estructura general de una planta potabilizadora donde se distinguen las siguientes etapas:

1. Captación del agua de un embalse, río o canal.
2. Paso del agua por rejas para un primer proceso de eliminación de sustancias grandes, desbaste y tamizado.
3. Adición de coagulantes y floculantes.
4. Proceso de coagulación.
5. Proceso de floculación.
6. Decantación.
7. Filtración por medio de un lecho de arena o carbón activo.
8. Adición de cloro para desinfección química.
9. Almacenamiento en galerías para que se produzca la desinfección.
10. Bombeo a la red de agua potable de la población.



Figura 2. Estructura general de una planta potabilizadora.
(<https://www.areaciencias.com/biologia/potabilizacionydepuraciondelagua/>)

Cabe resaltar que existen en la actualidad varios tipos de plantas potabilizadoras las convencionales (se usa un proceso más largo y lento, donde se emplea cloro), y las no convencionales (procesos más rápidos donde se utiliza el ozono debido a que limpia el agua de 600 a 3000 veces mejor que el cloro). Esta modernización consiste en ir introduciendo procesos y tecnologías a medida que se van requiriendo, sustituyendo maquinarias convencionales por no convencionales con tecnología innovadora que busque la sostenibilidad (Azuma, et al., 2022).

El proceso en las plantas convencionales y no convencionales es similar, la principal diferencia radica en la implementación de tecnologías innovadoras en la etapa fisicoquímica y en el tipo de desinfección. En las plantas convencionales se utiliza: aireación, ablandamiento, electrólisis, luz ultravioleta, osmosis inversa, microfiltración, ultrafiltración. Mientras que en las no convencionales se utilizan procesos más innovadores y sostenibles como: filtración directa, tratamiento con carbón activo, desinfección con ozono o cloro.

4.2.1. La Presa de Manises

La ciudad de Valencia se puede considerar como una de las pioneras en la construcción de plantas potabilizadoras, junto con París y Londres. En el año 1850 se inauguró la ETAP la Presa, en la localidad de Manises, que, hasta día de hoy, sigue en funcionamiento. A lo largo de los casi 200 años de vida, la potabilizadora se ha modificado y modernizado con las nuevas tecnologías para mantenerla a la vanguardia de los sistemas de potabilización, convirtiéndose hoy en una de las potabilizadoras punteras de España (González y Serra, 2016).

La ETAP de Manises es de las plantas potabilizadoras más antiguas del mundo, tal y como se ha dicho, y su temprana construcción se dio por diversos factores. En primer lugar, por el crecimiento de la ciudad, debido a la industrialización y el aumento de la población, ya que con ello empeoraron las condiciones higiénicas. Por otro lado, dada su cercanía al mar y al tratarse de un terreno muy llano, la canalización resultaba muy complicada y con ello empeoraba también la calidad del agua (González y Serra, 2016).

Esta planta produce cerca del 40% del agua potable de Valencia, llegando a suministrar a más de 850.000 habitantes, con un caudal medio de producción de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ y un máximo de $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 3).

El agua de entrada se capta de dos fuentes diferentes, el río Turia, el canal Júcar-Turia (procedente del pantano de Tous) o una mezcla de ambos. Debido a su antigüedad y a las muchas reformas sufridas a lo largo de los años, existen tres líneas de producción independientes, que permiten asegurar el abastecimiento a la ciudad.



Figura 3. ETAP la presa.

El agua tratada en la planta pasa por varios procesos para eliminar todo elemento nocivo para la salud, cumpliendo así con la normativa exigida (RD3 140/2003, 7 de febrero), que establece los criterios sanitarios para el agua de consumo humano. En la Figura 4, se presenta en detalle la estructura del funcionamiento de la planta en sus cuatro fases: pretratamiento (desbaste más preoxidación), decantación, filtración con carbón activo y desinfección.

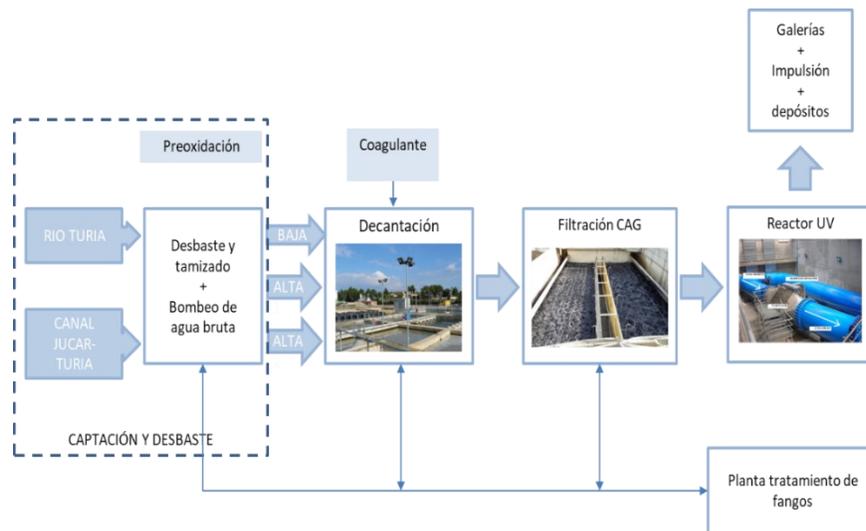


Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de potabilización.
(Fuente: Propia)

La instalación cuenta con un pozo de aspiración, en este pozo llega el agua de las diferentes fuentes (río y canal Júcar-Turia), allí reposa y pasa el primer proceso de eliminación de sólidos y sustancias de gran tamaño, como hojas, ramas y plásticos, comenzando así el pretratamiento. Los caudales de entrada se regulan mediante compuertas que permiten adecuarlos según la demanda. Además, también se usan los pozos para casos de emergencia o para momentos de alto consumo.

Debido a que la planta se encuentra en una cota superior a la del río, una vez el agua entra dentro del sistema, por medio de unas turbobombas hidráulicas de cámara partida, se impulsa a las diferentes estructuras de la planta para ser tratada. Este tratamiento puede seguir 2 líneas de producción diferentes, Alta 1 y Alta 2. Antiguamente había una tercera (Baja) que ahora se emplea para la recirculación en el tratado de fangos.

En las dos líneas de producción se emplean las mismas estructuras y tratamientos, la diferencia se encuentra en las estructuras/equipos que las componen. De esta forma se podrá entender la ETAP de la Presa, como dos plantas independientes que funcionan en paralelo, siendo la línea de Alta 2 más moderna y por ello la que lleva el peso de producción.

El proceso de pretratamiento es común en las dos líneas de producción y consiste en: la captación del agua, la preoxidación, el desbaste y el tamizado. Una vez aquí, por medio de bombas hidráulicas se traslada el agua al siguiente proceso de potabilización, tal como se indica en la Figura 4.

En la decantación de Alta 1 se emplean dos decantadores circulares con un caudal nominal de 300 l/s cada uno de ellos (Figura 5). Mientras que en Alta 2, hay dos decantadores lamelares con recirculación de fangos (Figura 6).

Los decantadores de la instalación de Alta 2 son más modernos, por lo que son capaces de trabajar con mayores caudales, aunque su tamaño es muy inferior si se compara con los decantadores circulares de Alta 1.

Los decantadores lamelares de Alta 2 tienen una superficie de 440 m² y ocupan un volumen total de 1 m³, siendo capaces de tratar 800-850 l/s de agua, por ello se consideran decantadores de alto rendimiento.



*Figura 5. Decantador circular Alta 1.
(Fuente: Propia).*



*Figura 6. Decantador Densadeg Alta 2.
(Fuente: Propia)*

En cuanto al sistema de filtración, el número de filtros en cada instalación es diferente; Alta 1 tiene 8 filtros frente a los 10 que tiene Alta 2. En las dos instalaciones se emplea el carbón activo

como lecho filtrante, y cada uno de los filtros puede trabajar hasta con 200 l/s. El caudal máximo de cada línea de producción viene determinado por los decantadores, este caudal depende también en parte de las características del agua de entrada a la planta. Cabe resaltar que la línea Alta 2 puede alcanzar caudales superiores a los de Alta 1, la cual puede acercarse a los 2 m³/s.

Durante todo el proceso de potabilización del agua se produce una corriente de fango. Estos residuos provienen principalmente de la purga de los decantadores y del lavado de filtros. Los fangos son tratados en la línea Baja. El sobrenadante, que es el agua clarificada de los espesadores de la línea de fangos (el 5% del caudal del fango tratado), es enviado a la entrada como agua bruta. El resto del fango se concentra mediante unas bombas centrífugas y se le da un uso agrícola cumpliendo con el RD1310/1990.

A partir de este momento nos centraremos en los tratamientos empleados en la línea de producción Alta 2, ya que es la línea principal de producción de la ETAP y es en la que se realiza el estudio de optimización de la etapa de coagulación-decantación.

4.3. Tratamientos en la ETAP La Presa.

Tal y como ya se ha comentado, para alcanzar la purificación del agua en La Presa de Manises se lleva a cabo el proceso en cuatro etapas: el pretratamiento, la decantación, el filtrado y la desinfección final. A continuación, se va a detallar cada una de estas etapas.

4.3.1. *El pretratamiento.*

Se divide en otros dos: uno de naturaleza física (el desbaste) y el otro químico (preoxidación). El desbaste, consiste en eliminar los sólidos más grandes que arrastra el agua bruta se realiza por medio de unas rejillas y un tamiz. Por otro lado, la preoxidación que tiene como objetivo una primera desinfección química. Además, evita la aparición y elimina sustancias que generan mal olor y sabor en el agua.

Antes de entrar el agua a la etapa de coagulación más decantación, se lleva a cabo la corrección del pH, ya que cada coagulante tiene un rango de pH donde resulta más eficaz (Fernández, 2016). En el caso de la ETAP de Manises, el agua de entrada presenta unos valores de 8-9 de pH, y el coagulante trabaja mejor y genera una menor cantidad de aluminio residual con valores de pH en torno al 7,5. Para ello se dosifica el CO₂, que al disolverse en el agua actúa como un ácido débil reduciendo el pH. Con la reducción del pH se consigue el punto de mínima solubilidad para el aluminio, haciendo que este precipite y no vuelva a disolverse en el agua.

4.3.2. *Coagulación/floculación y Decantación.*

La segunda etapa es la decantación, consiste en separar las sustancias suspendidas en el agua por medio de la acción de la gravedad. No todas las sustancias tienen el mismo tamaño, por lo que tienen tiempos diferentes de sedimentación. Por eso se emplean coagulantes-floculantes, que provocan el aglutinamiento de las sustancias aumentando su tamaño y reduciendo el tiempo necesario para que se depositen en el fondo (Souza et al., 2016). En el caso de la línea Alta 2 de La Presa, se emplean decantadores Densadeg (Figura 7).

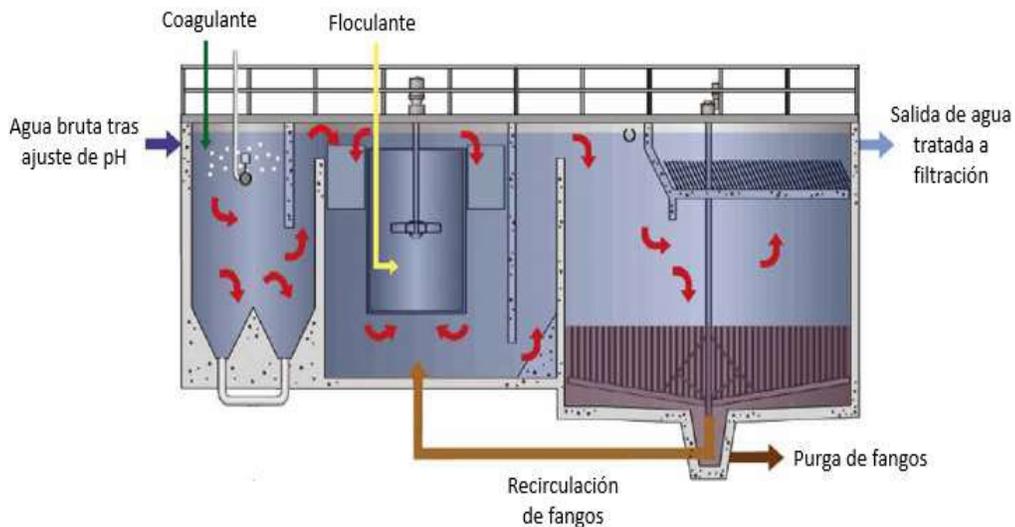


Figura 7. *Diseño decantador Densadeg.*
(Fuente: *Construcción y vivienda, 2019*)

Estos decantadores están divididos en 3 cámaras contiguas. La primera es la zona de mezcla, donde hay ubicado un agitador (alta velocidad) y se dosifica (según las necesidades) el preoxidante y el coagulante y se produce la coagulación. La zona intermedia, que se le llama cámara reactor, tiene un agitador lento y es donde se adiciona el floculante y coadyudante (en caso de ser necesario), y es donde se inicia el proceso de floculación. Desde esta segunda zona el agua pasa por medio de un vertedero a la última cámara.

La tercera cámara es la zona de decantación, hay una barrera al fondo que hace que se acumulen los flóculos en la poceta inferior, formándose el fango. A través de un sistema de barrido de fondo, se empuja el fango a una poceta central desde la que se recircula a la cámara previa o se extrae del decantador por medio de purgas manuales o automáticas.

Las lamelas, situadas en la parte más alta del decantador, tienen una posición inclinada y hexagonal, así se aumenta la superficie de decantación. La zona intermedia entre las lamelas y el fango concentrado del fondo está formada por una nube de fango con una concentración intermedia, por eso la nube se encuentra flotando en el líquido.

El agua que entra en esta tercera zona atraviesa primero el fango concentrado del fondo, haciendo que los flocúlos más grandes se adhieran a él y no suban hasta la superficie. Después avanza por la nube de fangos y las lamelas, adhiriéndose las partículas más pequeñas. Finalmente, el agua ya clarificada llega a la superficie y fluye por los canales hacia los filtros.

4.3.3. Filtrado.

El agua que sale de los decantadores entra en los filtros (tercera etapa), donde se inicia el proceso de filtración. La filtración consiste en eliminar partículas y/o microorganismos que hayan quedado en el agua de las etapas anteriores. Los filtros que se emplean son un medio poroso (carbón activo) llamado lecho filtrante. Este lecho actúa reteniendo los sólidos, eliminando los contaminantes relativos a compuestos orgánicos y para la eliminación de otros elementos contaminantes que provocan el mal olor adhiriéndolos al material filtrante, y dejando pasar los líquidos. A medida que pasa el tiempo, el filtro se va cargando de materia en suspensión y pierde eficacia. Para recuperar su funcionamiento inicial se realizan lavados con aire y agua. Al periodo de tiempo entre limpieza y limpieza se le conoce como carrera del filtro o ciclo de filtración.

El proceso de filtrado depende de la eficiencia de los tratamientos anteriores y es el responsable principal de la calidad del agua producida. Con un buen proceso de filtrado se consigue reducir la dosificación de desinfectante (cloro) en el proceso posterior, obteniéndose un agua de mejores propiedades.

4.3.4. Desinfección.

La cuarta fase de la potabilización es la desinfección final. Es un proceso cuyo objetivo es garantizar la potabilidad del agua por medio de la eliminación de los microorganismos causantes de enfermedades o patógenos (bacterias, virus y otros parásitos), que tal y como ya se ha comentado se realiza con cloro y lámparas UV, ya que son las más efectivas para la eliminación de microorganismos externos y parásitos dañinos (Quirós, 2005). Esta desinfección se realiza a la salida de los filtros por medio de radiación UV y su posterior cloración en los depósitos de agua que hay dentro de la ETAP, estos depósitos se les llama galerías.

Una vez el agua está en las galerías el proceso de potabilización está terminado, pero existen unos residuos adicionales, denominados lodos o fangos, que se deben considerar. Estos residuos se producen sobre todo en la decantación (purga de los decantadores) y en la filtración (con el lavado de filtros). Estos lodos se almacenan en unas balsas para permitir un aporte continuo a las siguientes etapas del tratamiento de fangos, que se lleva a cabo en la línea Baja: espesamiento, homogenización y secado.

4.4. Tratamientos físico-químicos.

Los tratamientos físico-químicos son el conjunto de operaciones y procesos destinados a la eliminación total o parcial de los componentes que se encuentran en un flujo, ya sea de origen industrial o natural, como en el caso de las potabilizadoras (Ferrer y Seco, 2005).

Dentro de estos tratamientos se encuentran los tratamientos de coagulación-floculación, que se utilizan en la eliminación de las partículas coloidales suspendidas en un medio acuoso, las cuales son responsables de la turbidez y color del agua (Ferrer y Seco, 2007). La turbidez es la capacidad de un líquido de dispersar un haz de luz luminoso, y puede deberse a partículas, algas o crecimientos bacterianos. Las partículas coloidales pueden mantenerse suspendidas por un tiempo muy duradero y son capaces de atravesar un medio filtrante, por lo tanto, tratamientos como la decantación o la filtración no son aptos para su eliminación.

En los procesos de coagulación y floculación, el objetivo es el de desestabilizar las partículas coloidales en suspensión para así facilitar la agrupación entre ellas. Este proceso se lleva a cabo con la adicción de productos químicos, seguido de una mezcla rápida y una más lenta posterior. Una vez se agrupan y forman un flóculo de mayor tamaño, éste se elimina por los procedimientos físicos como la decantación y/o la filtración.

Las aguas superficiales son de naturaleza heterogénea, tanto en el tamaño de las partículas como en su naturaleza, y esto determinara el tipo de tratamiento realizado dentro de la ETAP. Las partículas más grandes, como son las algas protozoarias, grava, detritus orgánicos, arena, etc. Son separadas del agua por tratamientos físicos (utilizados en la primera etapa de la ETAP de Manises, comentados anteriormente).

Cuando el tamaño de las partículas está comprendido entre los 10 y 100 mm se emplean sistemas de rejillas para su eliminación, entre los 0,2 y 10 mm se utilizan tratamientos de desarenación, sedimentación, decantación y flotación, y las comprendidas entre 0,01 y 0,1 mm se eliminan por filtración. En la Tabla 1 se indican los tiempos de decantación para cada tipo de partícula.

Tabla 2. Tiempo de decantación de partículas de diferente tamaño.
(Fuente: Andía (2000))

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Tiempo de caída por cada metro de decantación
Grava	10	1 s
Arena gruesa	1	10 s
Aena fina	0,1	2 min
Arcilla	0,01	2 h
Bacterias	0,001	8 días
Coloides	0,0001	2 años

Las partículas coloidales son partículas muy pequeñas con un tamaño comprendido entre 0,001 y 1 μm .

La causa de la estabilidad de estas partículas en el agua es la presencia de cargas electrostáticas del mismo signo en su superficie, que provocan unas fuerzas de repulsión entre ellas, impidiendo que se aglomeren y sedimenten de forma natural.

El origen de estas partículas viene dado por acciones naturales como la disolución de minerales, la erosión o la descomposición de materia orgánica. También por la influencia del ser humano al descargar residuos agrícolas, industriales y domésticos al agua.

En la ETAP La Presa predominan los coloides de origen mineral. Estos coloides tienen una carga eléctrica negativa sobre su superficie, llamadas cargas primarias. Estas cargas, a su vez, atraen a los iones positivos del agua, adhiriéndose al coloide y formando la capa comprimida.

Esta capa, al mismo tiempo, atrae a su alrededor iones negativos, de forma débil, sin llegar a adherirse y forman una capa difusa (Andía, 2000). En la Figura 8, se presenta el modelo de doble capa de una partícula coloidal.

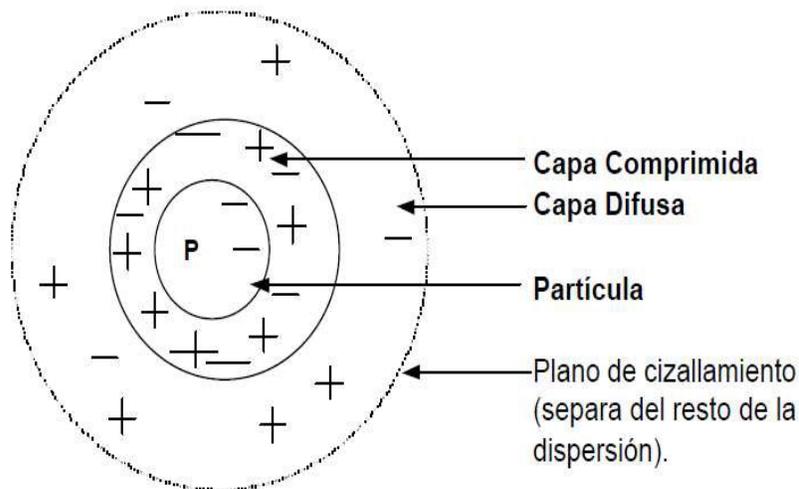


Figura 8. Modelo de doble capa de una partícula coloidal.
(Fuente: Andía (2000))

El colide negativo y la capa que le rodea, cargada positivamente, provocan un potencial eléctrico relativo a la solución. Este potencial alcanza un valor máximo en la superficie de la partícula que disminuye conforme se alejan de ella, llegando a valores próximos a cero fuera de la capa difusa. Este potencial es un indicador de las fuerzas repulsivas entre las partículas en función de la distancia. Cuanto mayor sea el potencial eléctrico, mayor será la repulsión electrostática (Andía, 2000).

De esta forma se observa que las partículas coloidales están sometidas a dos fuerzas de equilibrio opuestas entre sí, las fuerzas de atracción de Van der Waals y las fuerzas de repulsión electrostáticas. La relación entre las fuerzas de atracción y repulsión de las partículas explican por qué algunos coloides se agrupan mientras otros se repelen.

La repulsión electrostática es inversamente proporcional a la distancia entre las partículas, aumenta a medida que las partículas se aproximan, por lo que se necesita energía para vencer la repulsión y forzar la unión de las partículas. La atracción de Van der Waals es el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide y aumenta a medida que se acercan estos (Sandoval, 2000).

Si combinamos las curvas de estas dos fuerzas de equilibrio se obtiene una curva llamada energía neta de interacción. Esta curva nos muestra la energía necesaria para hacer que dos partículas choquen entre sí y se agrupen. Para ello será necesario aplicar una energía cinética mayor a la energía de barrera. En la Figura 9, se presenta la curva de energía neta de interacción propuesta por Zeta-Meter.

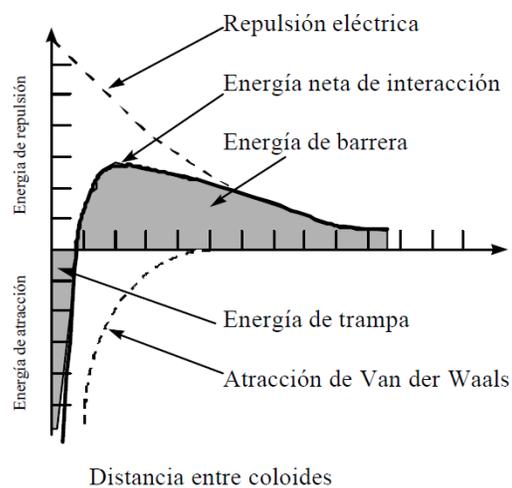


Figura 9. Curva de energía neta de interacción.
(Fuente: Sandoval, (2000))

4.5. Coagulación-floculación.

Los tratamientos físico-químicos llevados a cabo en la ETAP La Presa son la coagulación-floculación de las partículas coloidales y su posterior decantación. Se trata de un método universal que elimina sustancias de una gran variedad en naturaleza y peso a un bajo coste. Si se realiza mal el proceso de coagulación la calidad del agua se puede degradar aumentando los costes del tratamiento (Aguilar, 2002).

La floculación es el proceso que complementa la coagulación. Es la segunda etapa, cuyo objetivo es el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados. De esta forma, se

aumenta el peso y tamaño de éstos, consiguiendo una sedimentación más sencilla y rápida. Para llevar a cabo este proceso se emplean floculantes, también llamados coadyuvantes.

Estos ayudan a formar enlaces entre las partículas dando lugar a aglomerados. Ha de existir contacto entre los flóculos, por lo que debe existir una mezcla, pero no debe ser demasiado veloz, ya que hay que evitar que los flóculos se rompan.

A continuación, se van a exponer los tipos de reactivos y mecanismos de reacción utilizados en estos tratamientos.

- Tipos de reactivos.

Los coagulantes más comunes son las sales de hierro y aluminio como: sulfato de hierro, sulfato de alúmina, cloruro férrico, sulfato férrico o policloruro de aluminio. Forman hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles en el agua (Rodríguez et al., 2008).

En la ETAP La Presa se emplea el policloruro de aluminio. Este presenta ventajas en comparación con otros coagulantes ya que la turbidez residual, la materia orgánica y el aluminio residual presentan valores más bajos.

- Mecanismos de reacción.

La desestabilización producida por los coagulantes se puede conseguir por los siguientes mecanismos fisicoquímicos.

- 1- Compresión de doble capa.

Cuando dos partículas semejantes se aproximan, sus capas difusas generan una fuerza de repulsión debido a los iones que contiene. Esta fuerza de repulsión depende de la distancia que separa las dos capas difusas de las partículas y se reduce con el incremento de iones de carga opuesta, que se obtienen de los iones que forma el coagulante. Por otra parte, existen fuerzas de atracción, conocidas como fuerzas de Van der Waals, estas dependen solo de los átomos y no son afectadas por las características de la solución. Se priorizan las fuerzas de atracción frente a las de repulsión, de esta forma se consigue un incremento del tamaño de las partículas (Andía, 2000).

- 2- Absorción y neutralización de cargas.

En la superficie de las partículas coloidales hay unas cargas negativas, llamadas cargas primarias, que atraen a los iones positivos del agua formándose la primera capa adherida al coloide. El potencial (diferencias electrostáticas entre la partícula y solución) en la superficie, conocido como potencial Zeta, es el que determina el desplazamiento e interacciones de los coloides. La coagulación es la que se encarga de eliminar este potencial, ya que la fuerza natural de mezcla no es suficiente necesitándose un aporte extra de energía conseguido a través de una agitación mecánica (Andía, 2000).

3- Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.

Este mecanismo de coagulación tiene lugar cuando el agua presenta una turbidez baja y la cantidad de partículas coloidales es pequeña. En esta situación el coagulante al entrar en contacto con el agua formara unos hidróxidos metálicos, las partículas coloidales son atrapadas por los hidróxidos acelerando así su precipitado (Andia, 2000).

4- Adsorción y puente.

Cuando las partículas están cargadas negativamente, se puede obtener un tratamiento más económico utilizando un polímero orgánico sintético. Éstos poseen grupos químicos que pueden adsorber a las partículas coloidales. La molécula del polímero puede adsorber una partícula en uno de sus extremos e ir repitiendo el proceso en los otros sitios libres. Por eso se dice que el polímero forma el puente entre las partículas coloidales (Andia, 2000).

4.6. Sistema de dosificación.

En cuanto al sistema de dosificación de estos reactivos cabe decir que para una reacción adecuada del coagulante con el agua es necesario que este se adicione de manera constante y uniforme en la cámara de mezcla rápida, de forma que el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el agua (Andía, 2000).

En la ETAP La Presa se emplea como reactivo un polímero de policloruro al 10% en aluminio, prepolimerizado de alta basicidad (70% de grupos OH) que actúa como coagulante. Se trata de un fluido ligeramente viscoso, de color ámbar claro. Su almacenamiento se realiza en un depósito con dos módulos independientes. La concentración que se dosifica en planta depende de la turbidez del agua de entrada y del caudal, variando entre los 10 mg/L y los 50 mg/L. Como floculante no se emplea ningún reactivo.

El polímero se impulsa por medio de una bomba de membrana de impulsos. Para asegurar su dosificación de forma uniforme y constante, esta bomba impulsa el fluido a una cubeta de nivel constante y a través de esta, por desborde se dosifica en los decantadores de manera uniforme.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El trabajo consta de dos estudios independientes para buscar la mejora del proceso de coagulación-floculación en la potabilización del agua, por medio del uso de diferentes reactivos como coagulantes y floculantes. El primer estudio se lleva a cabo solo en laboratorio, mientras que el segundo se realiza una fase de laboratorio y posteriormente hay una implementación a escala real.

El **estudio 1** se divide a su vez en dos pruebas:

- En la prueba 1 se realizan cinco ensayos de jarras (Jar-test), donde se adiciona al agua problema el coagulante que se emplea habitualmente en la planta, policloruro de aluminio (PAC). Estos ensayos tienen el objetivo de buscar la concentración óptima de coagulante, para ello se dosifican concentraciones de 15, 20, 25 y 30 mg/L. Para determinar la concentración óptima de PAC se mide la turbidez final y se calcula el rendimiento de eliminación de turbidez.
- En la prueba 2, se analiza el efecto de añadir una mezcla de coagulante-floculante al agua problema. Para ello se estudian tres escenarios, donde se varía el floculante y se mantiene el mismo coagulante. El coagulante que se emplea es el PAC y los floculantes son almidón catiónico, polydadmac y poliacrilamida. Se realizan ensayos Jar-test con las diferentes mezclas para obtener la turbidez final y calcular el rendimiento de eliminación de turbidez. Los valores obtenidos, se comparan con los datos de la prueba 1 para comprobar si se produce una mejoría significativa.

El **estudio 2** también se divide en dos pruebas:

- La prueba 3 compara el coagulante empleado en planta (PAC) frente a otros cinco coagulantes: Naptol ST 50, Naptol MT 65, Naptol ST 335, Naptol MT 340 y Naptol EC 85. Para comparar estos coagulantes se realiza un Jar-Test con cada uno, dosificando 10 mg/L de coagulante y se evalúa la turbidez final.
- En la prueba 4, se procede a llevar a cabo un ensayo a escala real dentro del funcionamiento habitual de la potabilizadora, a partir de los datos óptimos obtenidos en el Jar-test.

5.1. Equipos utilizados en laboratorio y técnicas analíticas.

JLT Floculadores (Velp)

El equipo empleado para la realización de los ensayos de jarras es el JLT 4 de Velp científica (Figura 10). Este equipo está compuesto por un sistema de mezcla y agitación controlada, para reproducir las condiciones del proceso de coagulación-floculación. Además, consta de cuatro varillas de agitación de altura regulable, las cuales pueden ajustar su velocidad de 10 a 300 revoluciones por minuto (rpm). El tiempo de funcionamiento se controla por un procesador de operaciones desatendidas.



*Figura 10. JLT Floculadores.
(Fuente: Propia)*

Turbidímetro 2100N (Hach)

Equipo de mesa, se emplea para medición de la turbidez de las muestras antes y después del Jar-Test (Figura 11). La medición se basa en un método nefelométrico, se compara la intensidad de luz dispersada por una disolución. Cuanto mayor es la intensidad de luz dispersada por la muestra, mayor será la turbidez. Se pueden obtener los resultados en dos unidades de medida diferentes, en FNU (unidades nefelométricas de formazina) o en NTU (unidades nefelométricas de turbidez). En el estudio se utiliza NTU como unidad de medida, siendo el rango de medición del equipo de 0-4000 NTU, con un error de $\pm 2\%$ en el rango entre 0,01 a 1000 NTU y de $\pm 5\%$ en las lecturas comprendidas en los valores de 1000 a 4000 NTU.



Figura 11. Turbidímetro.
(Fuente: Propia.)

5.1.1. Procedimiento experimental del ensayo de jarras (Jar-Test).

La fase experimental de laboratorio consiste en la realización de una serie de ensayos Jar-test. Este ensayo se lleva a cabo con el equipo JLT 4, mostrado en el punto anterior, donde se introduce el agua problema, además del coagulante-floculante a estudiar. Se somete primero a una agitación rápida en la adición del coagulante y posteriormente, a una agitación lenta en la adición del floculante. Finalmente se deja en reposo estático, que simula las condiciones de un decantador. En los ensayos realizados, el agua problema se tomaba del canal o se trabajaba con una mezcla del canal y río.

El procedimiento detallado del Jar-Test consiste en los siguientes pasos:

1. Previamente se realiza una caracterización del agua problema para los ensayos. Valores de parámetros físico-químicos iniciales: pH, temperatura y turbidez.
2. En el equipo de Jar-test se utilizan vasos de precipitados con 1 L del agua problema.
3. En cada uno de los vasos se adicionan las diferentes concentraciones de coagulante a estudiar.
4. El equipo de Jar-test JLT4 se programa para la agitación rápida a 250 rpm durante 1 minuto, para la mezcla del coagulante con el agua, simulando tiempos similares a los de funcionamiento en planta.
5. Una vez transcurrido el minuto, se programa 15 minutos con agitación lenta a 35 rpm, para favorecer la formación de flóculos y en ese instante se introduce la dosis deseada de floculante (almidón, polydamac o poliacrilamida), en caso de querer emplearlos.
6. Una vez transcurridos los 15 minutos se quitan los agitadores de los vasos y se dejan 20 minutos para la decantación.
7. Se anota el progreso de flóculos atendiendo al tiempo de formación y tamaño.
8. Se anotan los tiempos de decantación de los flóculos y el aspecto visual del agua.

Una vez finalizados los 20 minutos, se toma una muestra del sobrenadante de cada vaso para analizar el pH, la turbidez y el aluminio residual.

Se llevan a cabo 2 estudios, tal y como se ha indicado al inicio de este punto. En el primer estudio se realizan dos pruebas para obtener la concentración óptima de coagulante y para probar tres tipos de floculantes. En el segundo estudio, se prueban 5 tipos de coagulantes diferentes. El parámetro de optimización en todos los casos es la minimización de la turbidez y en el estudio 1 también se mide la cantidad de aluminio residual del sobrenadante.

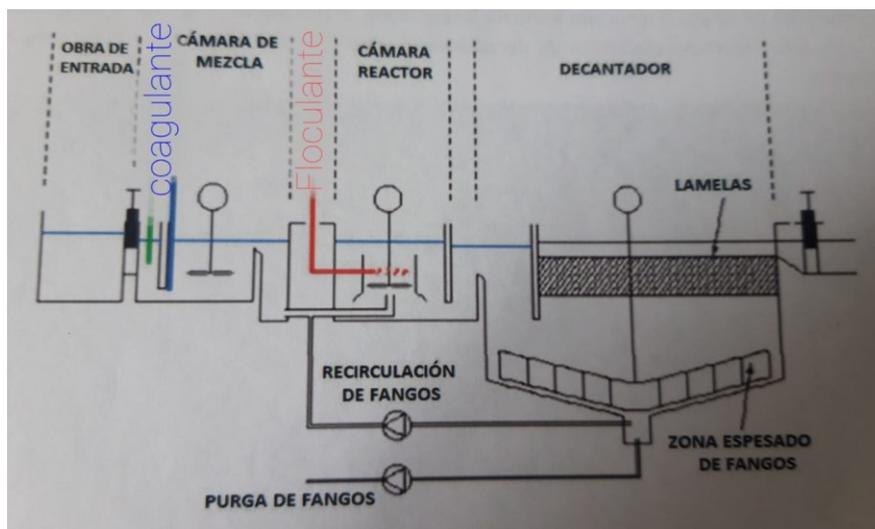
5.2. Equipos utilizados a escala real.

Decantador lamelar con recirculación de fangos (Densadeg)

Esta planta que se emplea para realizar el proceso de coagulación-floculación-decantación en la línea “ALTA 2” de La Presa. Tiene una superficie de 440 m³ y un caudal nominal de 1000L/s.

La Figura 12 representa el esquema de la instalación, donde se observa que previo al decantador se disponen dos cámaras. La primera, llamada cámara de mezcla, cuenta con un agitador rápido y es donde se dosifica el coagulante y se produce la coagulación.

La siguiente zona, llamada cámara reactor, tiene un agitador lento y es donde se dosifica el floculante, en caso de ser necesario y ocurre el proceso de floculación.



*Figura 12. Esquema de la instalación para el proceso de coagulación-floculación-decantación.
(Fuente: Propia.)*

Desde la cámara reactor, el agua pasa a través de un rebosadero al decantador donde se forma el lecho de fangos, estos fangos pueden ser recirculados o purgados, según las necesidades del proceso. En caso de ser recirculados, se hace por medio de una tubería que une la cámara de mezcla y la cámara reactor. Esta operación se lleva a cabo en caso de tener un agua con baja turbidez, ya que el coagulante no es efectivo en esas condiciones porque necesita cierta cantidad de sólidos para funcionar de forma eficaz.

El decantador se puede dividir en tres zonas según la altura. La zona más profunda, que es donde se acumula el fango por gravedad, actúa como un espesador de fangos de alta concentración y es donde se ubica un sistema de barrido de fondo que empuja los fangos a una poceta central, desde la cual se purga el exceso de fangos de forma automática.

Desde esa poceta central también sale otra tubería para la recirculación de fangos a la cámara reactor en caso de que fuera necesario.

La zona más superficial del decantador es en la que se encuentran las lamelas (Figura 13). Las lamelas tienen forma hexagonal (nido de abeja) y una posición inclinada, de esta forma se eleva la superficie de decantación, permitiendo un mayor caudal de agua de salida del decantador para una instalación del mismo tamaño.



Figura 13. Conjunto de lamelas del decantador.
(Fuente: <https://www.ecotec.es/lamelas-para-decantador.php>)

La zona intermedia del decantador es donde se forma un manto de fangos (nube), con una concentración intermedia. El manto flota en el agua, por lo que debe mantenerse estable para evitar que se acerque a las lamelas, que provocaría el escape de gran parte de los flóculos por arrastre, aumentando la turbidez del agua de salida del decantador.

El agua circula a través del decantador de la zona más profunda a la más superficial. Entra por el vertedero, atraviesa el lecho de fango primero y el manto después, para finalmente atravesar las lamelas y salir del decantador en dirección a los filtros.

Los dos decantadores Densadeg que se emplean para los ensayos a escala real son iguales, en tamaño, diseño y funcionamiento.

5.3. Estudio 1: Optimización del coagulante usado en planta mediante la adición de floculantes a escala laboratorio.

Para asemejarnos a las condiciones de trabajo de la potabilizadora, en los Jar-Test se emplea un agua problema que puede proceder del canal Júcar-Turia, del río Turia o una mezcla de ambos.

La planta potabilizadora, debe mantener un caudal ecológico mínimo del río Turia, debido a ello, no siempre se trabaja con agua de la misma fuente. Esto provoca que la turbidez de entrada varíe, aumentando cuando se trabaja con agua procedente del río Turia y disminuyendo conforme se aumenta la proporción de agua procedente del canal Júcar-Turia.

El estudio 1 se divide en dos pruebas, tal y como ya se ha comentado anteriormente, donde se realizan Jar-test para analizar el rendimiento de eliminación de turbidez.

Prueba 1: Optimización del coagulante sin floculantes.

Se realizan cinco Jar-Test en los que se trabaja con diferente turbidez de entrada, según la procedencia del agua tratada en ese momento en la potabilizadora, y diferente concentración de PAC (15, 20, 25, 30 mg/L). El objetivo es obtener un alto rendimiento de eliminación de turbidez

El PAC se almacena en la planta en cubas, ya que se trata de un líquido amarillento. En el laboratorio partimos de una disolución de PAC de 1g/L. Para calcular el volumen necesario de PAC en cada vaso seguimos el siguiente proceso:

$$C_x = \frac{C_0 \cdot V_x}{V_t} \quad V_x = \frac{C_x \cdot V_t}{C_0}$$

Siendo;

C_x = concentración de coagulante deseada en mg/L

V_t = Volumen total de la disolución en L

C_0 = concentración de la disolución inicial de PAC en mg/L

V_x = Volumen de coagulante a dosificar en L

Con ello se tiene que:

$$V_t = 1L$$

$$C_0 = 1g/L$$

$$C_{1,2,3,4} = 15, 20, 25, 30 \text{ mg/L}$$

Obteniendo los siguientes volúmenes de PAC a añadir a cada litro de agua a tratar:

$$V_1 = \frac{C_1 * V_t}{C_0} = \frac{15 * 1}{1000} = 0,015 L = 15mL$$

$$V_2 = 20mL$$

$$V_3 = 25mL$$

$$V_4 = 30mL$$

Prueba 2: Optimización del coagulante con la adición de floculantes.

– Prueba 2.1: Almidón catiónico (Chemifloc AC) + PAC

En primer lugar, se estudia la eficacia de la mezcla del coagulante PAC con un almidón como floculante, analizando el rendimiento de eliminación de turbidez. Este almidón se suministra en forma de escamas blanquecinas y se recomienda hacer una disolución entre 1-5% para trabajar con él. El proveedor indica que la concentración óptima de uso oscila entre 1 y 2 mg/L. Se prueban esas dos concentraciones con las de PAC de 15, 20, 25 y 30 mg/L.

Se prepara una disolución de almidón al 1%, para ello se disuelven 1g en 1L de agua desionizada, quedando una disolución de una concentración de 1g/L de almidón.

Siguiendo las ecuaciones del primer ensayo, se obtiene que trabajando con 1L de agua, la cantidad de floculante a añadir es de 1mL y de 2mL para añadir 1 y 2 mg/L de floculante.

– Prueba 2.2: Polydadmac (TEFLOC 4208 DW) + PAC

Según el proveedor, la dosis óptima esta entre 0,5-1mg/L de polydadmac. Con esta dosificación, según su experiencia se puede disminuir alrededor de 5 mg/l la dosificación de coagulante.

Para comprobar la efectividad del polydadmac se realiza un primer ensayo donde se mantiene la concentración de PAC fija en 20 mg/L y se trabaja con tres dosificaciones diferentes de floculante (0,5, 0,7 y 1 mg/L). Posteriormente, se realizan seis ensayos más con la dosificación óptima de floculante obtenida en el ensayo anterior y las concentraciones de PAC de 15, 20, 25, y 30 mg/L.

– *Prueba 2.3: poliacrilamida catiónica (superfloc) + PAC*

El RD 140 determina el límite máximo de acrilamidas que se puede dosificar para el tratamiento de aguas potables, por lo que la dosificación de poliacrilamida catiónica en los Jar-test la mantendremos por debajo de este valor.

Se realizan Jar-test con rangos de concentración de coagulante de 10, 15, 20 y 25 mg/L; mientras que la concentración de floculante que se emplea es de 0.25 y 1 mg/L.

5.4. Estudio 2: Comparativa entre coagulantes a escala laboratorio y a escala real.

El segundo estudio se divide también en dos pruebas, la prueba 3 que se realiza en el laboratorio y prueba 4 realizada a escala real. Los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio son los que determinan que coagulante se lleva al ensayo a escala real.

Se comparan un total de cinco coagulantes mixtos, se tratan de coagulantes de origen inorgánico basado en sales de aluminio y una parte orgánica.

Una vez se terminan los ensayos del laboratorio, se selecciona el coagulante que mejores resultados obtiene y se lleva a escala real. Para ello, se realiza un pedido mayor al proveedor y se hace una pequeña instalación para dosificar el nuevo coagulante en el decantador.

Una vez instalado, durante tres días se pone en marcha la dosificación del coagulante seleccionado y se toman muestras de los dos decantadores. El que funciona con el nuevo coagulante y el que funciona con el PAC.

Prueba 3: Comparativa entre cinco coagulantes a nivel de laboratorio.

Se emplea agua del canal Júcar-Turia para realizar los Jar-test, que tal y como se ha dicho presenta una turbidez muy baja. Para facilitar la visualización de los resultados de la prueba se añaden 180 mg/L de limo del río, dando lugar a un agua problema con una turbidez de 43 NTU.

Primero se realizan Jar-test para obtener los valores de dosificación óptima de coagulante PAC, variando su concentración entre 0 y 60 mg/L, con nuestra agua problema. Tras obtener el valor óptimo de dosificación de PAC, se realiza un Jar-test con esa concentración para los otros cinco coagulantes nuevos, Natpol ST50, Natpol MT65, Natpol ST 335, Natpol MT 340 y Natpol EC85.

Finalmente se seleccionan los coagulantes con mejores resultados (los cuales mejoran los valores obtenidos con PAC) y se repite la prueba, pero en este caso se reduce la concentración hasta obtener unos valores de turbidez final similares a los obtenidos en los ensayos PAC. Se prueban concentraciones un 20%, 40% y 60% inferiores a la concentración de PAC.

Prueba 4: Comparativa entre el nuevo coagulante y el usado en planta a escala real.

Durante esta fase, se propone el uso de dos coagulantes, el PAC y el óptimo de la prueba 3, que se dosificarán por separado en los decantadores 1 y 2 Densadeg de la instalación ALTA 2, operando en paralelo. El decantador 1 funcionará con el coagulante seleccionado en la prueba 3 y el decantador 2 con el coagulante de uso habitual en la planta (PAC). La concentración dosificada de PAC la determina el personal de control de la planta, según los parámetros del agua a potabilizar, que son la turbidez y el caudal de entrada.

Mientras que la concentración del nuevo coagulante se va disminuyendo, se empieza con la misma concentración y se reduce poco a poco con el fin de alcanzar los datos de reducción obtenidos en la prueba 3.

El objetivo fundamental es obtener una mejor decantación desde el punto de vista físico-químico, para disminuir los valores de turbidez del sobrenadante. La mejora del flóculo, más pesado y menos lábil optimizará el funcionamiento de los filtros de carbón activo, ralentizando el aumento de la pérdida de carga al utilizar caudales mayores.

Los dos decantadores lamelares Densadeg de la línea de ALTA 2, funcionan con un límite de turbidez a la salida de 3 NTU.

Para la dosificación de los coagulantes se emplean métodos diferentes. El PAC se dosifica de forma directa seleccionando la concentración desde la sala de control. El técnico de control selecciona la cantidad a dosificar que activa una bomba de impulsión (Figura 14), que manda el coagulante desde el tanque de almacenamiento hasta el decantador por medio de un cubeto de nivel constante (Figura 15).



Figura 14. Bomba de impulsión coagulante.
(Fuente: Propia.)



Figura 15. *Cubeto de repartición.*
(Fuente: Propia.)

Mientras, la dosificación del coagulante nuevo se realiza por una instalación auxiliar montada al lado de los decantadores. Este coagulante se deposita en tanques de 1m^3 y mediante una bomba de dosificación se impulsa hasta la entrada del decantador. Esta bomba se regula manualmente y se emplea la tabla 3 para calcular la potencia de trabajo en función del caudal a introducir.

Tabla 3. *Relación entre velocidad de la bomba y caudal dosificado de coagulante nuevo.*

Q dosificado (L/h)	% Bomba
10	19
15	25
20	30
25	36
30	42
35	47
40	53
45	58
50	64
55	70
60	75
65	81
70	86
75	92
80	98

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1. Resultados del estudio 1. Optimización del coagulante usado en planta mediante la adición de floculantes a escala laboratorio.

6.1.1. Prueba 1. Optimización del coagulante sin floculantes.

Se realizan 5 Jar-test en los que se probaron diferentes dosis de PAC, para determinar las concentraciones optimas de coagulante en función de la turbidez inicial del agua tratada. Los ensayos se realizaron con concentraciones de coagulante de 15, 20, 25 y 30 mg/L ya que el rango de concentraciones de trabajo en planta es entre 15 y 20 mg/L para turbidez baja, entre 20 y 25 mg/L para una turbidez media y superior a 30 mg/L cuando la turbidez es alta. Se considera una turbidez baja cuando se está por debajo de 5 NTU, una turbidez media entre valores de 5 y 15 NTU y una turbidez alta cuando se superan los 15 NTU. Durante estos Jar-test se emplean concentraciones de PAC comprendidas en el rango entre 15 y 30 mg/L, sin importar la turbidez inicial que presentan. En la tabla 3 se muestra un resumen de las condiciones iniciales de los ensayos.

Tabla 4. Resumen de ensayos realizados en la prueba 1.

Ensayo	Agua de canal	Agua de rio	Turbidez inicial (NTU)	Coagulante PAC (mg/L)
1	100%	0%	1,2	(15;20;25;30)
2	100%	0%	2,7	(20;25;30)
3	22%	78%	11,8	(20;25;30)
4	100%	0%	12,5	(20;25;30)
5	100%	0%	22,5	(15;20;25;30)

Al final del ensayo, las características visuales resultaron muy similares en todos los casos. Se observó la formación de microflóculos de tamaños similares, sin embargo, la cantidad de estos aumentó con el aumento de dosificación de coagulante. A mitad del ensayo, los vasos con menos dosificación de coagulante (15 y 20 mg/L) presentaban una nube de microflóculos aun sin sedimentar.

Los ensayos con concentraciones más altas de coagulante mostraron una mayor densidad de microflóculos, por lo que la velocidad de decantación será mayor.

En la Figura 16 se representa el rendimiento de eliminación (RE%) de la turbidez frente a la dosis de coagulante PAC. Este rendimiento se calcula de la siguiente manera:

$$RE\% = \frac{\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final}}{\text{Turbidez inicial}} * 100$$

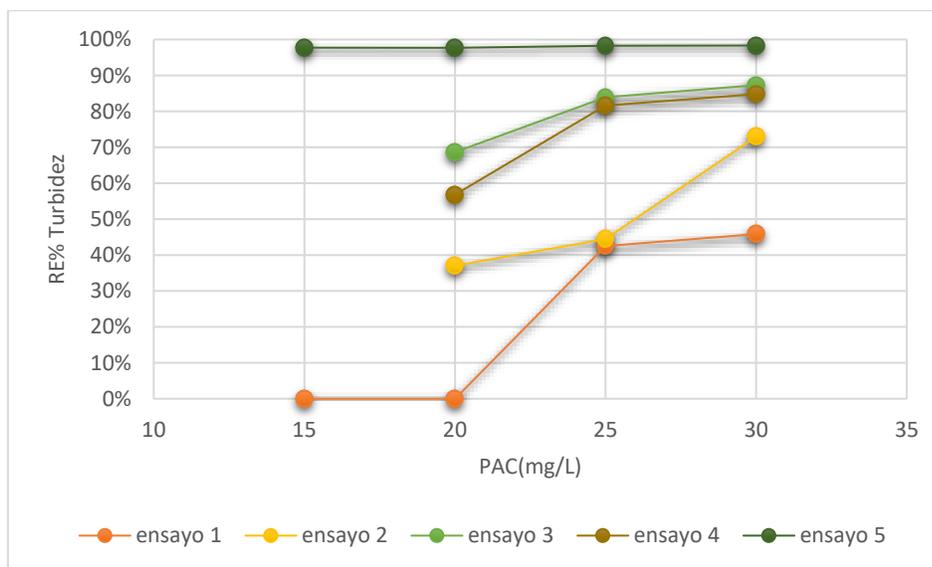


Figura 16. Prueba 1: ensayos 1-5. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%) en función de la concentración de PAC.

Se observa como el rendimiento de eliminación aumenta al aumentar la dosis de coagulante, salvo en el ensayo 5, con el agua más turbia, donde el rendimiento de eliminación se mantiene constante y muy cercano al 100% en todos los casos. Esto se debe al alto nivel de turbidez inicial en ese ensayo.

También se observa que en general el mayor aumento en el rendimiento de eliminación de turbidez ocurre cuando se pasa de los 20 a los 25 mg/L.

El rendimiento de eliminación de turbidez que se observa para la dosis de PAC entre 25 y 30 mg/L resultan muy similares en 4 de los 5 ensayos realizados. Por lo que se deduce que al aumentar la dosificación de coagulante por encima de 25 mg/L no se consigue un aumento significativo del rendimiento de eliminación de turbidez. Con estos resultados se decide tomar como dosis óptima de PAC 25 mg/L.

6.1.2. Prueba 2. Optimización del coagulante con la adición de floculantes.

Ensayos con PAC + Almidón.

Se realizan 2 ensayos, con 1 y 2 mg/L de almidón. Las dosis de PAC empleadas son de 15, 20, 25 y 30 mg/L. En la Tabla 5 se presentan la batería de ensayos realizados junto los resultados obtenidos:

Tabla 5. Resultados de los ensayos con PAC + Almidón.

Ensayo	Agua de canal	Agua de río	Coagulante PAC (mg/l)	Almidón (mg/L)	Turbidez (NTU)	RE% Turbidez
6	57 %	43 %	0	1	4,1	0
			15		3,6	12 %
			20		3,1	24 %
			25		3,2	22 %
			30		2,4	41 %
7	30 %	70 %	0	2	5,4	0
			15		9,6	-78 %
			20		9	-67 %
			25		9,9	-83 %
			30		9,1	-69 %

Los resultados visuales de ambos ensayos fueron positivos. En ambos ensayos, los cuatro vasos presentaron una formación de flóculos rápida facilitando la aglomeración entre ellos. El tiempo de decantación resultó inferior a 5 minutos, por lo que a los 20 minutos establecidos por el protocolo ya habían sedimentado todos ellos. A pesar de que en la observación visual se percibieron unos resultados mejores a los correspondientes a la prueba 1 sin floculante, los resultados analíticos mostraron lo contrario. En la Figura 17 se representa, el rendimiento de eliminación de turbidez del ensayo 6, donde se dosifica 1 mg/L de almidón comparada con la del ensayo 2 de la prueba 1, que presentan una turbidez inicial similar.

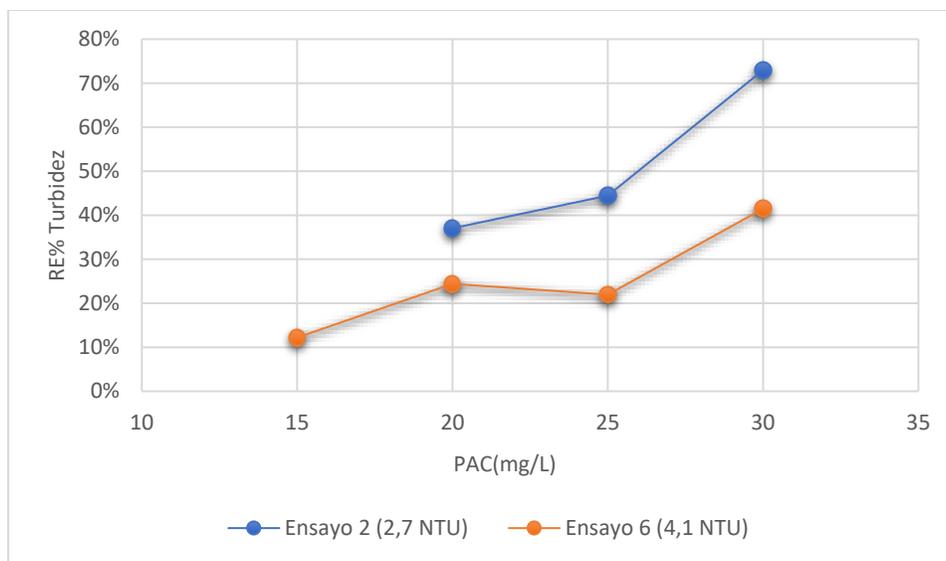


Figura 17. Prueba 2. Ensayos 2 y 6. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%).

En la Figura 17 se puede observar como el rendimiento de eliminación de turbidez es inferior para el ensayo con almidón en todo el rango de concentraciones de coagulante ensayado. Esto indica que la formación y posterior decantación de flóculos no es buena, ya que permanecen en suspensión microfloculos que aumentan los valores de turbidez finales. Por otro lado, en los resultados del ensayo 7, con una dosis de 2 mg/L de almidón, aumentó la turbidez, por lo que se obtuvieron valores negativos en el rendimiento. Este valor negativo indica que la calidad del agua empeora al aumentar la turbidez tras el ensayo. Todo ello hace desaconsejable el uso de almidón junto al PAC en el tratamiento de potabilización estudiado.

Ensayos con PAC + Polydadmac.

En un primer Jar-test se estudia la mejora en la eliminación de turbidez para diferentes valores de polydadmac, para ello se trabajó con una concentración fija de PAC de 20 mg/L y tres dosis diferentes de polydadmac: 0,5, 0,7 y 1 mg/L. En la Figura 18 se observa un aumento claro de eliminación de la turbidez conforme se aumenta la dosificación del floculante. A partir de este momento los siguientes ensayos se realizaron con una dosis fija de polydadmac de 1mg/L.

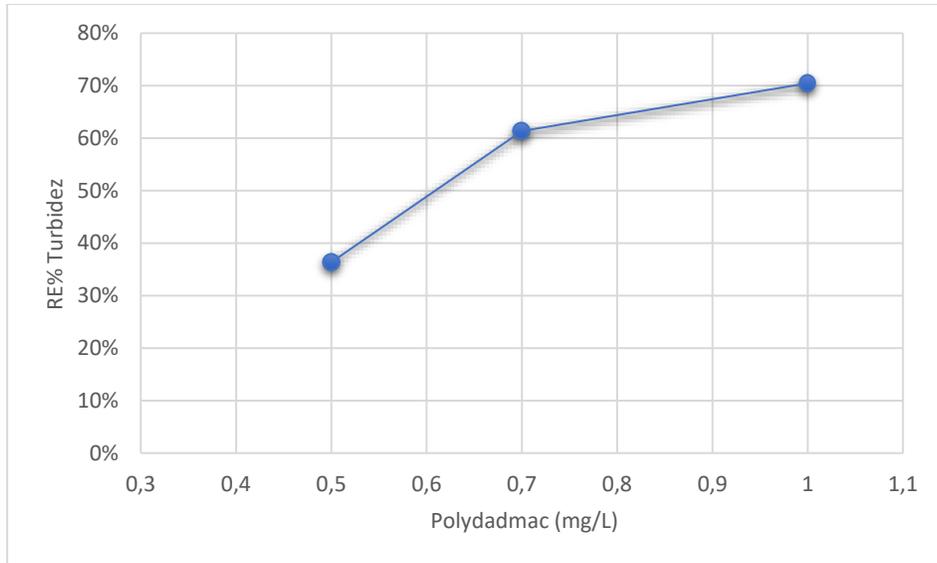


Figura 18. Rendimiento de la eliminación de la turbidez (RE%) en función de la concentración de Polydamac para 20mg/L de PAC.

En los seis ensayos realizados con 1 mg/L de polydamac (ensayos 8, 9, 10, 11, 12 y 13), que se pueden ver en la Tabla 6, los flóculos que se observaron fueron de menor tamaño que los observados con la adición de almidón. Tras finalizar el tiempo de mezcla lenta y dejando unos minutos para que se estabilizase, se observó el mismo efecto de formaciones de nubes de microflóculos visto en algunos ensayos de la prueba 1, que aumentan en densidad conforme aumenta la dosis de coagulante.

Tabla 6. Resultados de los ensayos con PAC + 1mg/L polydamac.

Ensayo	Agua de canal	Agua de río	Coagulante PAC (mg/l)	Turbidez (NTU)	RE% Turbidez
8	65 %	35 %	0	4,40	0
			20	1,80	59 %
			25	1,30	70 %
			30	1,10	75 %
9	51 %	49 %	0	2	0
			20	0,56	72 %
			25	0,43	79 %
			30	0,44	78 %
10	48 %	52 %	0	2,10	0
			15	2,10	0
			20	1,10	48 %
			25	0,71	66 %

Tabla 6 (continuación). Resultados de los ensayos con PAC + 1mg/L polydadmac.

11	100 %	0	0	3,80	0
			15	1,20	68 %
			20	0,96	74 %
			25	0,67	82 %
12	100 %	0	0	2,70	0
			15	2,30	14 %
			20	1,60	40 %
			25	0,82	69 %
13	51 %	49 %	0	1,30	0
			15	0,95	27 %
			20	0,92	29 %
			25	0,77	40 %

En los resultados obtenidos, donde se aprecia una tendencia similar a los correspondientes con solo el coagulante PAC, a medida que se aumenta la dosis de coagulante mejora el rendimiento de eliminación de turbidez y el mayor aumento se produce al aumentar la dosis de 20 a 25 mg/L.

Para evaluar la mejora proporcionada por el polydadmac, se representan los ensayos 2 y 1, con solo coagulante PAC junto a los ensayos 12 y 13 con floculante polydadmac (Figura 19), para dos muestras de agua con una turbidez inicial similar.

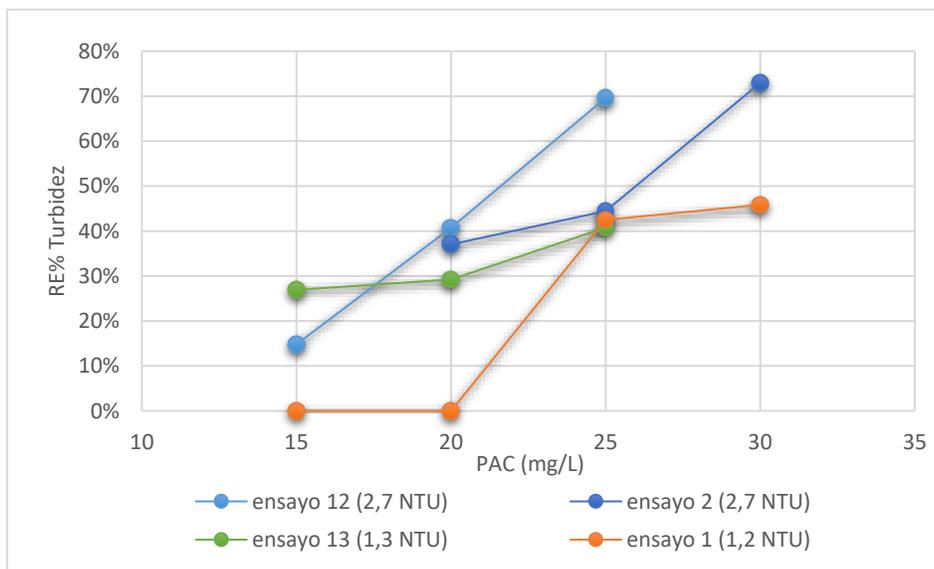


Figura 19. Prueba 2. Ensayos 2 y 1 frente ensayos 12 y 13. Comparación del rendimiento de eliminación de turbidez (RE%) de los ensayos con PAC frente a los que se emplean PAC + 1mg/L de polydadmac.

Al comparar estos ensayos se observa que para aguas con valores de turbidez más bajos (1,2 y 1,3 NTU) el rendimiento de eliminación de turbidez a bajas concentraciones de PAC se mejora con la adición de 1 mg/L de polydamac. Sin embargo, para concentraciones de PAC superiores a 25 mg/L resulta muy similar la turbidez obtenida en ambos ensayos, los que se emplea polydamac como floculante y en los que no.

En cambio, para aguas con una turbidez más alta (2,7 NTU), el floculante mejoró ligeramente el rendimiento de eliminación de turbidez, por ejemplo, para 20 mg/L de PAC y para 20 mg/L de PAC + 1 mg/L polydamac se obtuvo una eliminación de turbidez del 37,0 % y 40,7 %, respectivamente. Sin embargo, aunque se puede reducir el consumo de PAC se incrementa el asociado a la compra y dosificación del floculante, que no compensaría la mejora obtenida, por lo que no se aconseja utilizar polydamac con el PAC en el tratamiento del agua.

Ensayos con PAC + Poliacrilamida.

Los últimos ensayos del estudio 1 se realizan con el floculante poliacrilamida, la dosis recomendada por el proveedor se encuentra en torno a 1 mg/L de producto, por lo que se prueban las concentraciones de Poliacrilamida de 1 y 0,25 mg/L. En ambos ensayos se observó que al aumentar la concentración de PAC los rendimientos de eliminación de turbidez disminuían, justo lo contrario a lo esperado. Así que para verificar que no se cometió ningún error en el Jar-test se repitió el ensayo con 0,25 mg/L. Cabe indicar que para estos ensayos se testeó la concentración de 10 mg/L de PAC, ya que se quería comprobar si al emplear la poliacrilamida como floculante permitía trabajar con dosis inferiores de PAC a las empleadas habitualmente en planta. En la Tabla 7 se presentan los ensayos y resultados obtenidos:

Tabla 7. Resultados de los ensayos con PAC + poliacrilamida (0,25 y 1 mg/L).

Ensayo	Agua de	Agua de rio	Poliacrilamida (mg/L)	Coagulante PAC (mg/l)	Turbidez (NTU)	RE% Turbidez
14	0	100 %	1	0	5,31	0
				10	0,98	81 %
				15	0,78	85 %
				20	1,20	77 %
				25	1,30	75 %
15	100 %	0	0,25	0	1,08	0
				10	0,35	67 %
				15	0,38	64 %
				20	0,47	56 %
				25	0,55	49 %
16	30 %	70 %	0,25	0	2,30	0
				10	0,54	76 %
				15	0,64	72 %
				20	0,87	62 %
				25	1,20	47 %

Para este floculante se observa que a medida que se aumenta la dosificación de coagulante el rendimiento de eliminación de turbidez se reduce, por lo que la mezcla de PAC + poliacrilamida trabaja mejor con una baja dosificación de coagulante PAC.

Para comparar el efecto de dosificar poliacrilamida junto al coagulante PAC, frente a dosificar PAC sin floculante, se representan en la Figura 20 los rendimientos de eliminación de turbidez frente a la concentración de PAC de los ensayos 2 (turbidez inicial 2,7 NTU) frente a los ensayos 14 y 16 (turbidez inicial 5,3 y 2,3 NTU).

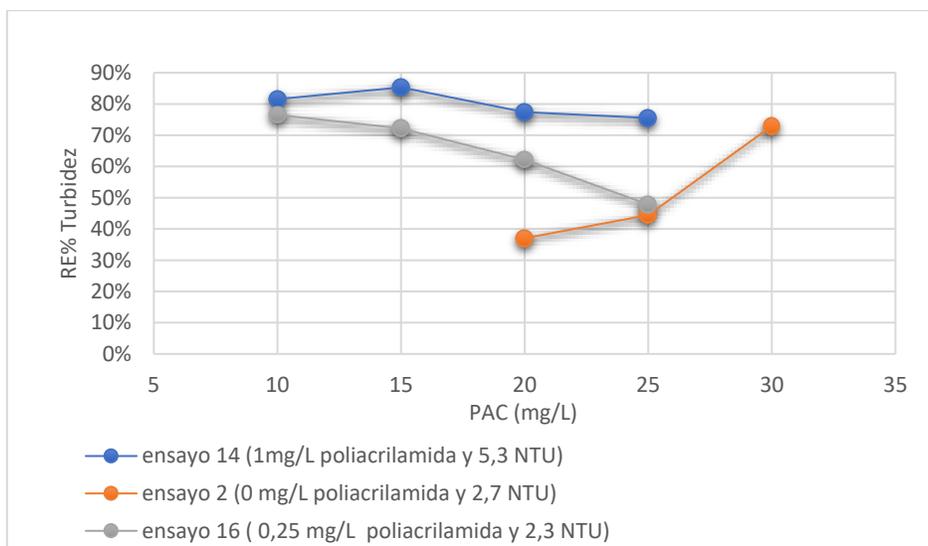


Figura 20. Prueba 2. Ensayos 2 frente ensayos 14 y 16. Comparación del rendimiento de eliminación de turbidez (RE%) de los ensayos con PAC frente a los que se emplean PAC + poliacrilamida.

Al comparar los resultados de PAC + poliacrilamida con los ensayos donde solamente se emplea PAC, se aprecia que para 20 mg/L de PAC el rendimiento de eliminación de turbidez es mayor cuando se añade poliacrilamida, tanto para una turbidez inicial de 2,3, que pasa del 37,0 % al 62,2 % con 0,25 mg/L de floculante, como para la turbidez de 5,3 que alcanza el 77,4 % al añadir 1 mg/L. Sin embargo, a partir de concentraciones de PAC de 25 mg/L, y teniendo en cuenta la tendencia vista para el PAC + poliacrilamida, es más eficiente la eliminación de turbidez cuando se emplea el coagulante solo, para la misma turbidez inicial.

Para optimizar la dosis de poliacrilamida se probaron dosis intermedias entre 0,25 y 1 mg/L con dosis más bajas de coagulante (10 y 15 mg/L), ya que es cuando mejor funciona el par PAC + poliacrilamida. En concreto se testearon 0,5, 0,8 y de nuevo 1 mg/L. En la Tabla 8 se representan los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados de los ensayos con PAC + poliacrilamida (0,5, 0,8 y 1 mg/L).

Ensayo	Agua de	Agua de rio	Poliacrilamida (mg/L)	Coagulante PAC (mg/l)	Turbidez (NTU)	RE% Turbidez
17	60 %	40 %	0,8	0	5,31	0
				10	0,15	97 %
				15	0,11	97 %
18	30 %	70 %	1	0	5,31	0
				10	0,16	97 %
				15	0,13	97 %
19	30 %	70 %	0,5	0	5,31	0
				10	0,31	94 %
				15	0,36	93 %

En los resultados obtenidos no se aprecia casi ninguna diferencia en los rendimientos de eliminación de turbidez para los diferentes valores de coagulante PAC y para las tres concentraciones de poliacrilamida, que en todos los casos tienen rendimientos por encima del 93 %. En cuanto a la dosis óptima de floculante poliacrilamida, cabe indicar que sería 0,8 mg/L.

El uso de poliacrilamida como floculante resulta interesante cuando la turbidez inicial con la que se trabaja es baja, siendo más efectivo actuando junto a concentraciones bajas de PAC. Para una turbidez de 5,3 NTU y añadiendo 0,8 mg/L de poliacrilamida a 10 mg/L de PAC se consigue un rendimiento de eliminación del 97 %. Mientras que, empleando coagulante PAC sin floculante, con una turbidez inicial de 2,7 NTU y dosificando 30 mg/L solo se elimina el 73 % de turbidez. Sin embargo, para valores de turbidez muy altos, como en el ensayo 5 (22,5 NTU), con 15 mg/L de PAC se elimina el 97 %, por lo que en este tipo de aguas más turbias no sería aconsejable el uso de la poliacrilamida. Por tanto, dado que los valores de turbidez inicial en la ETAP La Presa son muy variables, superando los 15 NTU en temporada de lluvia, se desaconseja su uso para el tratamiento de potabilización de agua.

Tras estos ensayos con floculantes, y pese a la mejora en los resultados obtenidos con dos de ellos, 1 mg/L de polydacmac y 0,8 mg/L de poliacrilamida, hay que tener en cuenta que, al emplear dos químicos diferentes, afectara a los filtros de carbón activo, cuya finalidad es eliminar posibles restos derivados, ya que requieren mayor regeneración de carbón en menor tiempo. Por ello, para implementar su estudio a escala real, las mejoras obtenidas deben ser considerables frente al uso del PAC solo. Dado que en los ensayos presentados las mejoras dependen de la turbidez de entrada del agua, no es aconsejable utilizar floculantes, siendo mejor un aumento de concentración de PAC cuando sea necesario.

6.2. Resultados del estudio 2. Comparativa entre coagulantes a escala laboratorio y a escala real.

6.2.1. Prueba 3. Comparativa entre coagulantes a escala de laboratorio.

El agua recibida en planta presenta una turbidez muy baja, lo que dificulta el análisis de los resultados, por ello se añadió al agua problema 180 mg/L de limo del río. De esta forma se consiguió aumentar la turbidez hasta los 43 NTU. Se aumentó la turbidez de entrada para que los valores de turbidez final al dosificar diferentes concentraciones de PAC muestren mayores diferencias entre ellos y poder evaluar mejor los cambios asociados a su dosificación.

Con esta agua problema se realizó una primera serie de Jar-test con dosis crecientes de PAC (10, 20, 30, 40, y 50 mg/L). Los resultados de turbidez y rendimiento de eliminación de turbidez a partir de los 20 mg/L de PAC obtenidos resultaron muy similares y poco concluyentes. Por lo que se repitieron los Jar-test reduciendo la dosis de PAC (3, 6, 10 y 13 mg/L) y se mide la turbidez final (Tabla 9).

Tabla 9. Prueba 3: Relación entre la turbidez final obtenida y la concentración de PAC dosificado.

Turbidez inicial (NTU)	C_PAC (mg/L)	turbidez final (NTU)
43	3	6,69
	6	5,28
	10	3,38
	13	5,51

Con los resultados de la Tabla 9 se concluye que 10 mg/L de PAC es la dosis óptima para esta agua problema y condiciones. Con esta dosificación se obtiene el valor más bajo de turbidez final, con el que se consigue reducir la turbidez un 92 %.

Para esta concentración óptima se realiza un Jar-test con los cinco nuevos coagulantes, repitiendo las mismas condiciones de laboratorio que en el anterior ensayo y empleando la misma agua problema (Tabla 10).

Tabla 10. Prueba 3: Jar-test con PAC y 5 coagulantes nuevos.

Turbidez inicial (NTU)	Coagulante 10 mg/L	Turbidez final (NTU)
43	PAC	3,38
	Natpol ST50	1,02
	Natpol MT65	2,16
	Natpol ST335	1,07
	Natpol MT340	1,96
	Natpol EC85	6,41

Los mejores resultados se obtuvieron para el ensayo realizado con Natpol ST50 y el Natpol ST335, que redujeron en ambos casos hasta un 97,5 % la turbidez. Por lo que se continuó el estudio con estos dos coagulantes.

En el siguiente paso se buscó reducir la dosificación de estos coagulantes para obtener unos valores de turbidez final similares a los conseguidos con los 10 mg/L de PAC. Para ello se realizaron los ensayos que muestra la Tabla 11.

Tabla 11. Prueba 3: Jar-test para optimizar la concentración de Natpol ST50 y Natpol ST335.

Turbidez inicial (NTU)	Coagulante	Turbidez final (NTU)
43	10 mg/L PAC	3,38
	8 mg/L Natpol ST50	1,72
	8 mg/L Natpol ST335	2,01
	6 mg/L Natpol ST50	2,34
	6 mg/L Natpol ST335	3,17
	4 mg/L Natpol ST50	5,16
	4 mg/L Natpol ST335	5,67

Con los resultados obtenidos se observa que los valores que más se acercan a los obtenidos con el coagulante PAC son los dos en los que se dosifica 6 mg/L de coagulante, es decir, un 40 % menos de reactivo. De los dos tipos de Natpol, el que mejor reacciona es el Natpol ST50, ya que con una dosificación un 40 % inferior a la de PAC la turbidez obtenida es menor.

Con estos datos se concluye que el estudio a escala real se realizará con PAC y con el Natpol ST50.

6.2.2. Prueba 4. Comparativa entre el nuevo coagulante y el usado en planta a escala real.

Tras los ensayos realizados en el laboratorio se pasó al estudio a escala real. Éste se realizó en 3 días, donde se recogieron muestras a la entrada y salida de los decantadores y se analizó su turbidez en el laboratorio. A lo largo de los ensayos se fue reduciendo la cantidad del Natpol ST50, para comprobar si con una reducción del 40 % en su dosificación se obtenían los mismos resultados que con el PAC.

Día 1.

Se inició el estudio a las 9:20 h de la mañana y se finalizó a las 20:00 h de la tarde. Cabe indicar que el abastecimiento del caudal de captación de agua a tratar no es siempre el mismo, varía a lo largo del día. Si las condiciones de nivel de los depósitos lo permiten, se mantiene un caudal constante a lo largo de la mañana mientras se vacían los depósitos (para conseguir una

renovación del agua). Posteriormente, a lo largo de la tarde se aumenta el caudal de agua a potabilizar.

El caudal de entrada a los decantadores se modificó durante el ensayo en tres ocasiones, de 9:20 h a 16:00 h se mantuvo un caudal constante de 550 L/s. A las 16:00 h se aumentó el caudal a 650 L/s hasta las 19:00 h. En la última hora del ensayo el caudal con el que se trabajó fue de 1.050 L/s. A lo largo del ensayo la turbidez de entrada no se mantuvo constante, además el aumento de caudal provocó que el tiempo de permanencia del agua en el decantador fuera menor. Para contrarrestar estos efectos, la concentración de PAC se aumentó al aumentar la turbidez de entrada o el caudal de agua a tratar. Todos estos datos se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12. Prueba 4. Datos día 1.

Hora	Turbidez entrada (NTU)	Natpol (mg/L) DEC 1	PAC (mg/L) DEC 2	Q (L/s) agua decantada	% reducción Natpol vs PAC
9:20	8,9	15,76	18,58	550	15 %
10:30	5,7	13,79	16,10	550	14 %
11:30	6,1	13,13	16,10	550	18 %
12:30	6,6	13,13	16,10	550	18 %
13:30	7,9	13,13	16,10	550	18 %
14:30	8,3	13,13	16,10	550	18 %
15:30	8,6	13,13	16,10	550	18 %
16:30	8,7	14,94	20,96	650	29 %
17:30	7,8	14,94	20,96	650	29 %
18:30	7,6	14,94	20,96	650	29 %
19:30	7,7	20,63	25,95	1050	20 %
20:00	7,6	20,63	25,95	1050	20 %

En la Figura 21 se comparan los resultados de turbidez obtenidos a la salida de cada decantador a lo largo del día.

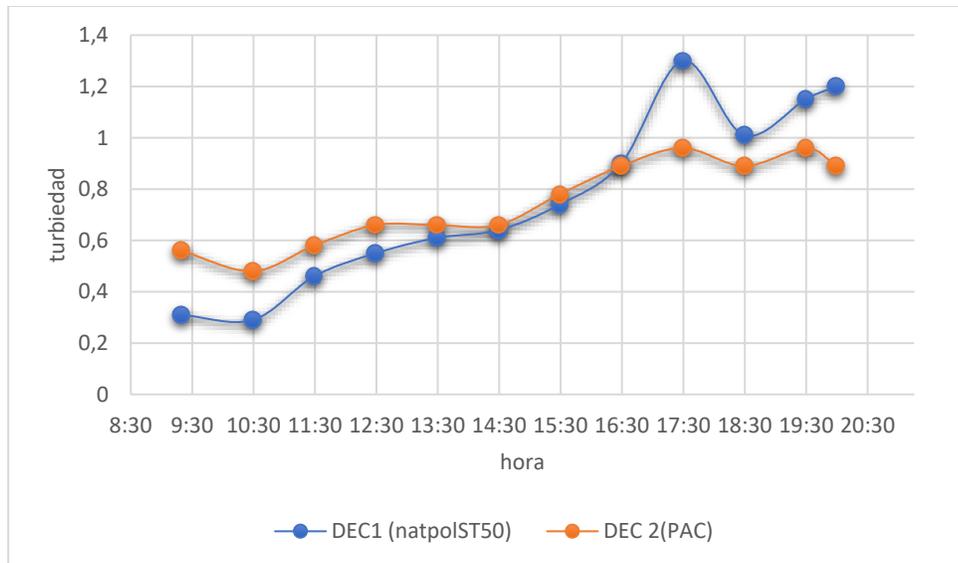


Figura 21. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 1.

Viendo la evolución en los dos decantadores, se deduce que para caudales de entrada de agua más bajos (550 L/s de las 9:20 a las 15:30), el Natpol ST50 tiene un funcionamiento ligeramente mejor que el PAC, con valores de turbidez inferiores, a pesar de utilizar entre un 15 y un 18 % menos de reactivo. Con los dos aumentos de caudal a 650 y 1050 L/s, aumentó la turbidez de salida en el decantador con Natpol ST50, debido seguramente a una excesiva reducción de este coagulante frente al PAC.

Día 2.

El segundo día de estudio solo se realizó por la mañana, empezó a las 8:35 h y finalizó a la 13:30 h. Se mantuvo un caudal de entrada constante durante toda la mañana de 700 L/s, por lo que se aprovechó para reducir la dosificación de Natpol ST50 durante el ensayo. De 8:35 h de la mañana a 11:30 h, la dosificación de Natpol ST50 fue un 20 % inferior a la de PAC, y a partir de las 11:30 h y hasta finalizar el ensayo se redujo un 30 %. En la Tabla 13 se recogen las concentraciones dosificadas de coagulante.

Tabla 13. Prueba 4. Datos día 2.

Hora	Turbidez entrada (NTU)	Natpol (mg/L) DEC 1	PAC (mg/L) DEC 2	Q(L/s) agua decantada	% reducción Natpol vs PAC
8:35	6,90	21,89	27,00	700	19 %
9:30	6,70	21,89	27,00		19 %
10:30	6,70	21,89	27,00		19 %
11:30	6,60	17,03	25,00		32 %
12:30	6,50	17,03	25,00		32 %
13:30	5,80	17,03	25,00		32 %

En la Figura 22, se representa la turbidez de salida de cada decantador a medida que avanza el ensayo. La tendencia de la turbidez de salida fluctuó ligeramente en ambos decantadores, pero en general se puede decir que fue similar mientras se trabajó con una concentración de Natpol ST50 reducida al 20 % (8:35 a 11:30 h). Cuando se pasó a trabajar con una concentración de Natpol ST50 un 30 % inferior, la turbidez de salida aumentó ligeramente en comparación con la turbidez de salida del decantador donde se trabaja con PAC, aunque este aumento no fue significativo (1,95 NTU y 2,41 NTU con PAC y Natpol ST50 en el último muestreo, respectivamente), sobre todo teniendo en cuenta que se usó un 32 % menos de Natpol.

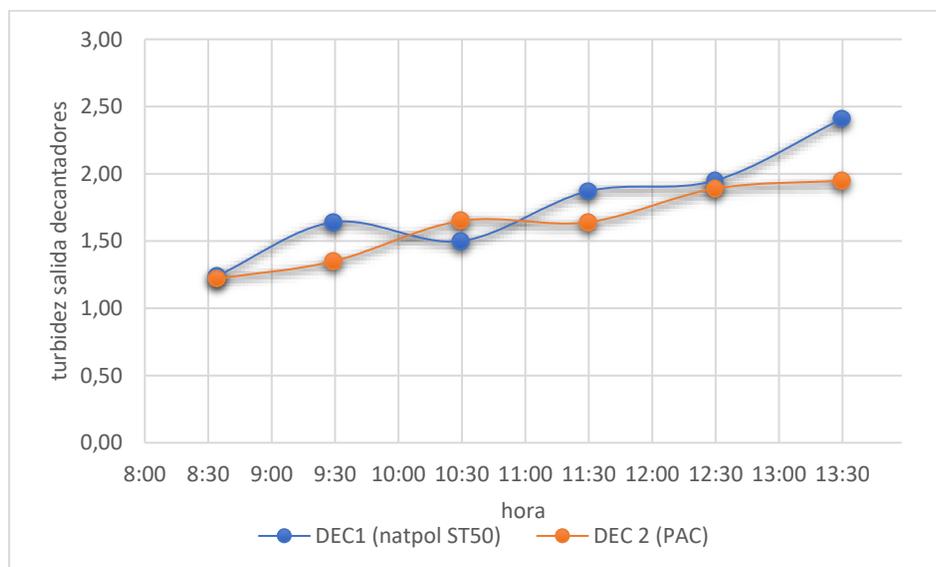


Figura 22. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 2.

Día 3.

Se realizó el estudio por la mañana, se comenzó a las 9:30 h y finalizó a las 13:30 h. Al igual que en el día 2 de estudio, el caudal de entrada de agua a los decantadores fue constante, de 700 L/s, por lo que se decidió replicar los ensayos realizados el día 2. En este caso, se puede observar que la turbidez del agua de entrada fue algo inferior a la del día 2. Además, debido a un problema en la planta, a las 10:30 h se pasó a coger toda el agua de entrada del canal Júcar-Turia, que venía con una turbidez inferior a la del río. A las 12:00 h se volvió a mezclar el agua de entrada del río y del canal Júcar-Turia. Este hecho provocó una reducción de la turbidez de entrada a planta mientras se cogió agua procedente del canal Júcar-Turia, posteriormente cuando se volvió a trabajar con agua procedente del río y del canal Júcar-Turia la turbidez subió. En la Tabla 14 se muestran las concentraciones de coagulante dosificadas a lo largo del día y la turbidez inicial con la que se trabajó.

Tabla 14. Prueba 4. Datos día 3.

Hora	Turbidez entrada (NTU)	Natpol (mg/L) DEC 1	PAC (mg/L) DEC 2	Q(L/s) agua decantada	% reducción Natpol vs PAC
9:30	5,10	24,33	30,00	700	19 %
10:30	3,40	18,49	24,00		23 %
11:30	3,20	16,05	24,00		33 %
12:30	3,50	15,57	24,00		35 %
13:30	5,10	23,35	30,00		22 %

En la Figura 23, se representa la turbidez de salida de los dos decantadores a medida que avanza el estudio.

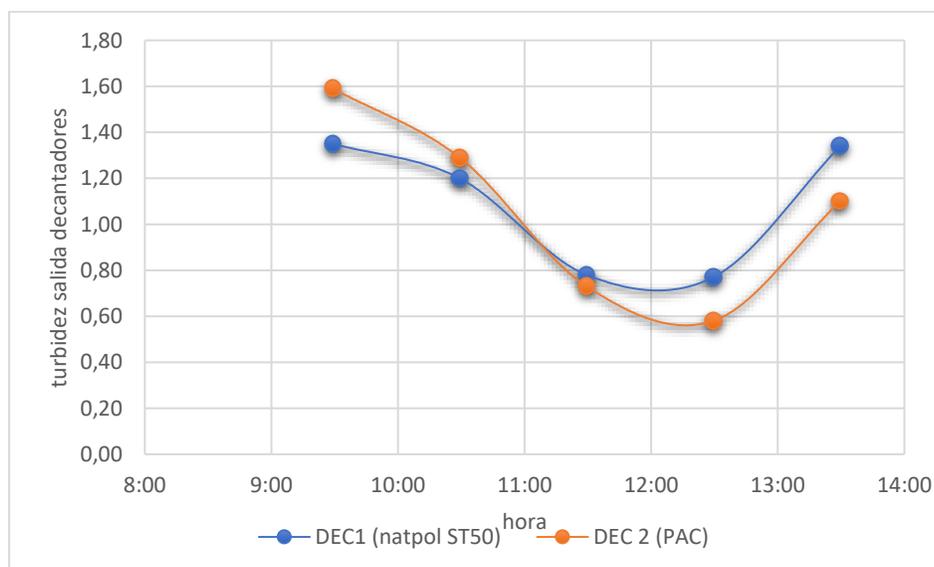


Figura 23. Prueba 4. Evolución de la turbidez del agua a la salida de cada decantador a lo largo del día 3.

Desde las 11:30 se operó con un 30 % menos de Natpol ST50, consiguiendo valores de turbidez similares a los obtenidos con PAC.

Tras los ensayos realizados a escala real, se verifica que es posible trabajar con un 30% menos de Natpol ST50, obteniendo resultados similares a los conseguidos con PAC, por lo que puede ser un sustituto del PAC en caso necesario.

Una vez se conoce cuanto se puede reducir la dosificación de Natpol ST50 se realiza un estudio económico de los ensayos del día 3. Para ello se calcula el coste de tratar agua con 24 mg/L de PAC y 16,80 mg/L de Natpol ST50 durante una hora con un caudal de 700 L/s.

El precio que nos facilitan los distribuidores es de 0,3 €/kg de PAC y 0,81 €/kg de Natpol ST50. La cantidad en masa de coagulante dosificado son de 0,016 kg/s de PAC y 0,011 kg/s de Natpol ST50. Se multiplica por 3600 para calcular el total en una hora, 60,48 kg/h de PAC y 42,34 kg/h de Natpol ST50.

El coste de dosificar cada coagulante es de 18,14 €/h de PAC y 34,29 €/h de Natpol ST 50, por tanto, aunque es técnicamente viable la sustitución de uno por otro, no lo es desde el punto de vista económico.

7. CONCLUSIONES

A partir de los datos de cada estudio realizado se extraen las siguientes conclusiones específicas.

Estudio 1. Optimización del coagulante usado en planta mediante la adición de floculantes.

- Los ensayos de Jar-test realizados con el coagulante usado en planta (PAC) indican que la concentración óptima es de 25 mg/L, para una turbidez del agua de entrada inferior a 12,5 NTU.
- Por otro lado, de los ensayos de Jar-test realizados con cada uno de los tres floculantes y el coagulante PAC, se sacan las siguientes conclusiones.
 - Para los ensayos realizados con la mezcla de PAC + Almidón, los resultados obtenidos muestran valores de turbidez final mayores que en los ensayos solo con PAC por lo que se descarta su uso. Por ejemplo: el rendimiento de eliminación de turbidez para 25 mg/L de PAC + 1 mg/L de Almidón es del 22 %, mientras que cuando se emplea solo PAC es del 44 %.
 - En los ensayos donde se emplea PAC + Polydadmac, se obtiene que la concentración óptima de trabajo del polydadmac es de 1 mg/L, con la que se mejora el proceso de formación de floculo, y en la desestabilización y choque entre coloides y se reduce la turbidez. Sin embargo, la turbidez tras el tratamiento es similar a la obtenida con PAC

solo. Por ejemplo: para 20 mg/L de PAC y para 20 mg/L de PAC + 1 mg/L polydadmac se obtuvo una eliminación de turbidez del 37,0 % y 40,7 %, respectivamente.

- De los ensayos Jar-test donde se emplea PAC + poliacrilamida, se obtiene que la concentración óptima de poliacrilamida es de 0,8 mg/L. Su uso como floculante resulta interesante cuando la turbidez inicial de agua a tratar es baja, quedando descartado para valores de turbidez elevados. Por este motivo se descarta su estudio a escala real, ya que el rango de valores de turbidez con los que se trabaja en la ETAP La Presa es muy amplio, superando las 15 NTU en temporada de lluvia.

Estudio 2. Comparativa entre coagulantes a escala laboratorio y a escala real.

- En los ensayos de laboratorio, se observa que el coagulante Natpol ST50 obtiene resultados de turbidez final similares que los obtenidos con el coagulante PAC, reduciendo la dosificación un 40% de Natpol ST50.
- En el estudio a escala real, realizados con PAC y Natpol ST50, se confirma la posibilidad de emplear un 30 % menos de Natpol ST50, obteniendo los mismos resultados que con el PAC. Por todo ello, se concluye que la utilización de Natpol ST50 como coagulante para la potabilización de agua, se trata de la opción más adecuada en cuanto a eficacia y eficiencia, debido a que se consigue una reducción de la dosificación manteniendo, además, la calidad de los resultados. Pese a ello, el uso de Natpol ST50 no es viable desde el punto de vista económico, debido al elevado coste de este coagulante. Precio de tratar 700 L/s durante una hora dosificando 24 mg/L de PAC y 16,80 mg/L de Natpol ST50; 18,14 €/h de PAC y 34,29 €/h de Natpol ST 50.
- Por todo ello, no se realiza ningún cambio en la ETPA La Presa, continuando con el coagulante PAC como único reactivo a dosificar para reducir la turbidez del agua a tratar.

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Una vez se ha identificado cuantitativamente cuan de eficiente es el proceso de coagulación-floculación-decantación empleando las diferentes combinaciones de coagulantes y floculantes propuestos, es importante abrir nuevas líneas al estudio de coagulantes de uso industrial.

Los coagulantes tradicionales basados en sales de aluminio pueden llegar a ser tóxicos en grandes cantidades y generan residuos contaminantes. Por ello, una de las nuevas líneas de estudio es el uso de coagulantes de origen natural, que sean más eficientes y sostenibles. Estos coagulantes cumplen con el compromiso medioambiental. Son polímeros multifuncionales de tecnología de varios pasos, es decir, coagulan, pero al mismo tiempo no necesitan añadir un estabilizante de pH. Algunos de estos coagulantes naturales que se encuentran en estudio son las semillas de Nirmali, la Moringa oleífera, taninos y otros coagulantes procedentes de diferentes tipos de cactus.

Otra línea de estudio es el desarrollo de nuevos métodos de aplicación de los coagulantes. Tradicionalmente los coagulantes se aplican directamente en el flujo de agua por medio de una disolución acuosa. Se están investigando nuevos métodos de aplicación, como puede ser la aplicación en seco o en forma de nanopartículas, que podrían mejorar la eficiencia del proceso.

Una de las ventajas del desarrollo de coagulantes basados en nanomateriales, es que estos tienen una gran superficie específica. Esta característica les otorga una gran capacidad para adsorber partículas en suspensión, lo cual les hace más eficaces que los coagulantes tradicionales.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Andía Cárdenas, Yolanda. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima.
- Mumford, L. (2005). Historia natural de la urbanización. La incidencia de la especie humana sobre la faz de la tierra:(1955-2005). Universidad de Granada.
- Osorio Valero, Y. (2008). Diagnóstico a la planta potabilizadora de la UCLV con vistas a mejorar la calidad del agua (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas). <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/123456789/1125>
- Lapeña, M. R. (1989). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales (Vol. 27). Marcombo.
- Souza, M. É. S., Carvajal, T. L. R., & Leite, J. C. (2016). The Process of Management for the Treatment and Reuse of Water through Decantation. Business Management Dynamics.
- Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- Azuma, T., Usui, M., & Hayashi, T. (2022). Inactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria in Wastewater by Ozone-Based Advanced Water Treatment Processes. Antibiotics.
- González, J. A. P., & Serra, P. A. (2016). La importancia del higienismo y la potabilización del agua en la ciudad de Valencia (1860-1910). Investigaciones Geográficas (España).
- Fernández, R. (2016). Pretratamientos/Aguas Escuela de Organización Industrial, Madrid.
- Construcción y Vivienda (2019). Suez: Tratamiento y reutilización de aguas residuales. Revista Agua y Saneamiento. Lima-Perú.
- Quirós, F. R. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloraminas. Técnica industrial.
- Ferrer Polo, J., & Seco Torrecillas, A. (2005). Tratamientos físicos y químicos de aguas residuales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).
- Ferrer Polo, J., & Seco Torrecillas, A. (2007). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España)
- Sandoval Yoval, Luciano, Montellano Palacios, Leticia, Piña Soberanis, Martín & Sánchez Guzmán, Laura Olivia (2000). Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Aguilar, M. I. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. Editum.

Capítulo 2:
PRESUPUESTO

En el presente capítulo aparecen desglosados todos los costes necesarios para la realización del estudio realizado en el trabajo de fin de grado, Optimización de la etapa físico-química en la ETAP de La Presa (Manises). Estudio de diferentes alternativas para la mejora del rendimiento del proceso y reducción de costes en el tratamiento.

Tabla 1. Coste de mano de obra

Concepto	Unidad	Precio unitario (€/h)	Cantidad (horas)	Importe (€)
Estudiante en practicas	h	4,5	150	675
Jefe de laboratorio	h	25	50	1250
				1925

Tabla 2. Coste de materiales no amortizables.

Concepto	Unidad	Precio unitario (€/unidad)	Cantidad	Importe (€)
Guantes desechables de nitrilo	Ud	0,10	100	10
Bata de seguridad	Ud	24,15	1	24,15
Gafas de seguridad	Ud	3,02	1	3,02
Vaso de precipitados 1000 mL	Ud	7,02	7	49,14
Vaso de precipitados de 30 mL	Ud	5,84	6	35,04
Botes estériles de plástico 500mL	Ud	1,12	9	10,08
Pipeta automática de pistón 1-10 mL	Ud	100	1	100
Punta de pipeta estéril 1-10mL	Ud	0,08	80	6,40
				237,83

Tabla 3. Coste de reactivos empleados.

Concepto	Unidad	Precio unitario (€/Kg)	Cantidad (Kg)	Importe (€)
Policloruro de Aluminio	Kg	0,30	36	10,80
Almidón	Kg	1	0,1	0,10
Polydamac	Kg	2,20	0,1	0,22
Poliacrilamida	Kg	2,80	0,1	0,28
Natpol ST50	Kg	0,81	24	19,44
				30,84

Tabla 4. Coste de materiales amortizables.

Concepto	Unidad	Precio unitario (€/unidad)	Cantidad	Vida útil (años)	Tiempo de uso (h)	Importe (€)
Balanza analítica	Ud	1200	1	10	10	0,14
Turbidímetro 2100N	Ud	4500	1	10	15	0,77
JLT Floculadores	Ud	2900	1	10	35	1,16
Bomba centrifuga	Ud	300	1	10	18	0,06
						2,13

Tabla 5. Presupuesto de ejecución por contrata.

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	
CONCEPTO	IMPORTE
PERSONAL	1925
MATERIAL NO AMORTIZABLE	237,83
REACTIVOS	30,84
MATERIAL AMORTIZABLE	2,13
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)	2195,80
Gastos generales (13%)	285,45
Beneficio Industrial (6%)	131,75
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)	2613,00
IVA (21%)	548,73
PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	3161,73

El coste total de la realización del estudio es de **TRES MIL CIENTO SESENTA Y UN EUROS CON SETENTA Y TRES CENTIMOS** (3161,73 €).